

[illegible]

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ПРОМИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

До захисту допущено

Завідувач кафедри

Ю.С. Ямненко

(підпис)

(ініціали, прізвище)

„_____” _____ 2019р.

Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки 6.050802 Електронні пристрої та системи
(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

на тему: «Модель хмарного покриття над сонячною електростанцією»

Виконав: студент 4 курсу, групи ДС-51

Сукач Роман Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник: к.т.н., доц. Клен К.С.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультанти: Технічний розділ д.т.н., проф. Жуйков В.Я.

(назва розділу)

(вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент: к.т.н., доц. Попов А.О.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Модель сонячної електростанції. Алгоритм diamond-square. Вікно програми моделювання.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технічний	Жуйков В.Я., проф.		

7. Дата видачі завдання « 22 » травня 2019 року _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строки виконання етапів проекту	Примітка
1	Консультація з керівником практики	22.05	
2	Огляд літератури	22.05-24.05	
3	Дослідження проекту PVGIS 5	25.05-26.05	
4	Дослідження впливу атмосфери на сонячне випромінювання	27.05-28.05	
5	Аналіз складових програми	29.05-1.06	
6	Розробка алгоритму diamond-square	2.06-3.06	
7	Розробка моделі хмарного покриття та сонячної панелі	4.06-5.06	
8	Дослідження ефективності роботи алгоритму	6.06-7.06	
9	Компонування складових програмного середовища	8.06-12.06	
10	Дослідження роботи програмного середовища	13.06-14.06	
11	Підготовка пояснювальної записки та графічного матеріалу	14.06-18.06	

Студент

(підпис)Сукач Р. В.
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)Клен К.С.
(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

В бакалаврській роботі розглядається задача створення моделі хмарного покриття для потреб моделювання сонячної електростанції. Наукова новизна отриманих результатів полягає у врахуванні просторового розташування модулів та наведенні способу отримання зображення проекції хмарного покриття достатньої роздільної здатності. Для цього виконується перетворення даних про інтенсивність сонячного випромінення низької роздільної здатності, отриманих із супутника. Отримана модель може бути використана для моделювання різних підсистем сонячної електростанції в умовах, наближених до реальних. Також можна дати більш точні оцінки енергії, що буде отримана при роботі електростанції оскільки враховується низка факторів окрім середньої інтенсивності сонячного випромінення за деякий проміжок часу.

ANNOTATION

The aim of the bachelor thesis is to create a model of cloud cover for the needs of the solar power plant modeling. The scientific novelty of the results is that the spatial arrangement of the modules was taken into account and a way of obtaining sufficient coverage of the cloud was given. To do so, the conversion of accurate data on the low-resolution intensity of solar radiation received from the satellite has been made. The obtained model can be used for modeling of different subsystems of solar power plant in conditions, close to real ones. It is also possible to obtain more accurate estimates of the energy that will be obtained from the operation of the power plant since a number of factors are taken into account besides the average intensity of solar radiation over a period of time

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА РОБОТИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	6
1.1 Особливості роботи сонячних електростанцій	6
1.2 Класифікація хмар	9
1.3 Методи оцінки інтенсивності сонячного випромінення	11
1.3.1 Оцінювання інтенсивності	12
1.3.2 Розрахунок інтенсивності за даними супутника	15
1.3.3 Обчислення інтенсивності на нахиленій поверхні	17
1.3.4 Обчислення потужності PV модулів	18
1.3.5 Спектральний склад випромінення	19
2. МОДЕЛЬ ХМАРНОГО ПОКРИВУ	22
2.1. Кут падіння сонячного проміння	22
2.2. Модель хмари	24
2.2.1. Обробка зображень хмарного покриву	24
2.2.2. Створення інтерполяційної сітки	27
2.3. Модель сонячної панелі	30
2.3.1. Представлення характеристик панелей	30
2.3.2. Засоби роботи з моделлю	34
3. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В РОЗРОБЛЕНІЙ ПРОГРАМІ	39
3.1. Опис інтерфейсу програми	39
3.2. Результати моделювання	42
ВИСНОВКИ	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	49
ABSTRACT	

					ДС51.510.101.001.ПЗ			
Зм	Арк	№ докум.	Підпис	Дата	Модель хмарного покриву над сонячною електростанцією Пояснювальна записка	Літера	Лист	Листів
Розроб.	Сукач Р.В.						3	50
Перевір.	Клен К.С.							
Н.контр.						НТУУ «КП» ФЕМ каф. ПЕ		
Затверд.	Клен К.С.							

ВСТУП

Останні двадцять років спостерігалися значні якісні зміни в складі вироблюваної енергії в світі. Значно зросла частка відновлюваної енергетики в окремих країнах світу. Наприклад КНР, де якість повітря з кожним роком погіршується, а в багатьох областях вже характеризується як «нездорова», активно розвивають альтернативну енергетику. В Індії за допомогою сонячних електростанцій вирішують проблему забезпечення енергією малих, розріджених населених пунктів. В Україні потужність сонячних електростанцій (СЕС) в 2018-му році досягла рівня 1389 МВт, а це майже вдвічі більше ніж в 2017-му. Також запланована побудова найпотужнішої СЕС України – Нікопольської СЕС, потужністю 200 МВт. Загалом у світі з 2009 року спостерігається стійка тенденція до нарощування потужностей альтернативної енергетики.

Незважаючи на те, що для широкомасштабного введення в експлуатацію СЕС необхідно подолати чимало технологічних проблем, як-то мала ефективність сонячних панелей, низька продуктивність допоміжних підсистем СЕС, різноманітні економічні завади (а саме високі фінансові витрати на побудову електростанції та відсутність механізмів фінансування), сонячна енергетика визнається одним з небагатьох засобів задоволення постійно зростаючого енергетичного попиту [2].

Згідно з зауваженням, важливою вбачається задача моделювання СЕС та її підсистем з урахуванням багатьох факторів, наприклад хмарний покрив, температура, положення сонця. Не менш важливим є врахування просторового розміщення СЕС та навіть врахування вітру. Такий підхід дозволяє, по-перше, ретельно перевіряти напрацювання перед уведенням у експлуатацію, по-друге, порівнювати різні варіанти підсистем. Сучасні середовища моделювання електричних процесів або зовсім не надають можливості враховувати хоча б частину приведених факторів, або не надають гнучких засобів для моделювання цих факторів.

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

На основі результатів моделювання даються рекомендації щодо просторового розміщення сонячних панелей СЕС для забезпечення її роботи у режимі відбору максимальної потужності, проводиться аналіз факторів, які призвели до втрати потужності.

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА РОБОТИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

1.1. Особливості роботи сонячних електростанцій

Сонячна електростанція - інженерна споруда, що перетворює сонячне випромінювання в електричну енергію. Одним з основних стримуючих чинників розвитку сонячної енергетики є проблема вибору місця для розміщення сонячних електростанцій. Потужність сонячного випромінювання на поверхні землі при безхмарному небі становить близько 1 кВт / м². Для отримання електроенергії в промислових масштабах необхідні потужності близько мільйона кіловат. Це означає, що для промислової СЕС з коефіцієнтом корисної дії близько 10% і з урахуванням нерівномірності потужності сонячного випромінювання протягом доби необхідна площа в десятки квадратних кілометрів.

Майданчик для розміщення приймачів сонячного випромінювання повинна бути рівною, придатної для обслуговування і ремонту устаткування, вільної від господарської діяльності людини.

Ідеальним рішенням цієї проблеми є розміщення СЕС на поверхні морів і океанів, площа яких в п'ять разів більше, ніж площа суші. Однак, традиційні СЕС не придатні для морського базування. Способи перетворення сонячного випромінювання різні і залежать від конструкції електростанції. В роботі розглядається СЕС на основі фотоелектричних модулів.

Фотоелектричні СЕС безпосередньо перетворюють сонячну енергію в електроенергію за допомогою явища фотоефекту. СЕС даного типу зображено на рис. 1.1.

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

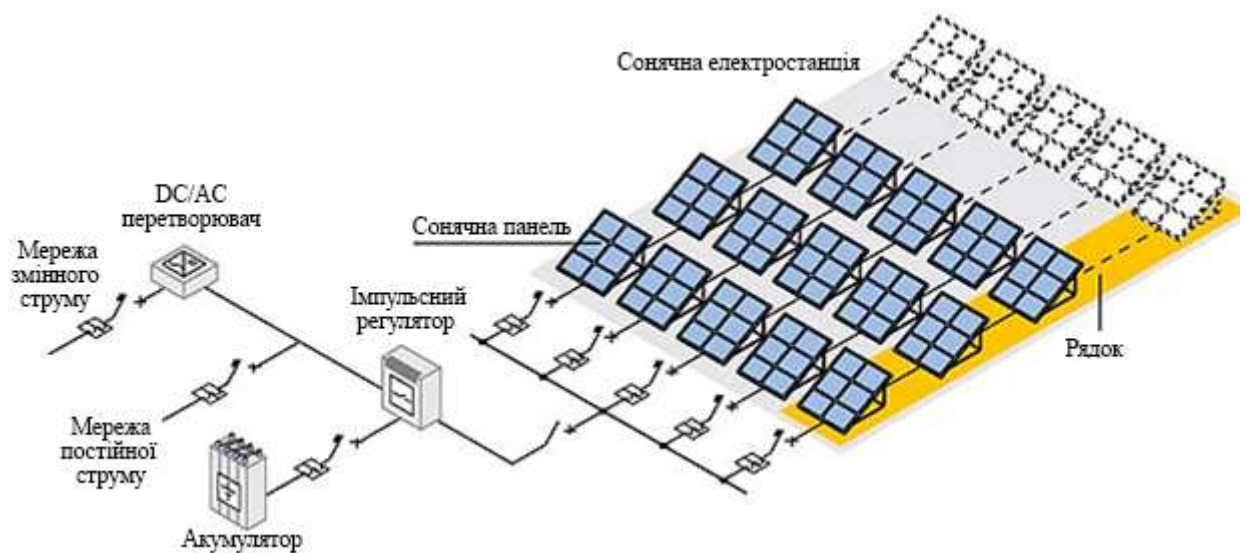


Рис. 1.1. Склад фотоелектричних СЕС

Головним елементом фотоелектричних станцій є сонячні панелі. Вони складаються з фотоелементів і можуть перетворювати сонячну енергію в постійний електричний струм.

Фотоелектричні перетворювачі відрізняються надійністю, стабільністю, а термін їх служби практично не обмежений. Вони можуть перетворювати як прямий, так і розсіяний сонячне світло. Невелика маса, простота обслуговування, модульний тип конструкції дозволяє створювати установки будь-якої потужності. До недоліків СП можна віднести високу вартість і низький ККД до 30%.

СП використовують для енергопостачання автономних споживачів малої потужності, живлення радіонавігаційної і малопотужної радіоелектронної апаратури, приводу експериментальних електромобілів і літаків.

При побудові сонячних електростанцій неминуче виникає питання - як з'єднувати сонячні панелі і чим відрізняються варіанти підключення. Існують 3 варіанти з'єднання СП між собою. Для того щоб зрозуміти чим вони відрізняються, звернемося до основних характеристик сонячних панелей:

- напруга U_n - номінальна напруга СП (як правило 12В або 24В, але існують і винятки);

- напруга U_{mp} - напруга при якій панель видає максимальну потужність;
- напруга U_{oc} - напруга холостого ходу (важливо при виборі імпульсного регулятора для акумуляторної кислотної батареї);
- напруга U_{dc} - максимальна напруга у системі;
- струм I_{mp} - струм при максимальній потужності панелі;
- струм I_{sc} - струм короткого замикання, максимально можливий струм панелі.

Потужність СП визначається як добуток напруги та струму в робочій точці, при якій від панелей відбирається максимальна потужність і що називається точкою максимальної потужності.

Вихідні характеристики та вибір необхідного імпульсного регулятора залежить від схеми з'єднань СП.

СП можна з'єднати наступним чином:

1) Послідовне з'єднання СП. При такому з'єднанні декількох панелей, напруга всіх панелей буде складатися. Струм системи буде дорівнювати струму панелі з мінімальним струмом. З цієї причини не рекомендується з'єднувати послідовно панелі з різним значенням струм максимальної потужності, оскільки працювати вони будуть не в повну силу.

2) Паралельне з'єднання СП. При цьому напруги на виході кожної панелі будуть рівні між собою і дорівнювати напрузі на виході з системи панелей. Струм від всіх панелей буде складатися. Таке з'єднання дозволяє, не піднімаючи напруги збільшити струм від панелей.

3) Комбіноване (послідовно-паралельне) з'єднання СП. Останній тип з'єднання об'єднує в собі два попередніх. Застосовуючи цю схему з'єднання панелей, ми можемо регулювати напругу і струм на виході з системи кількох панелей, що дозволить підібрати найбільш оптимальний режим роботи всієї СЕС.

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1.2. Класифікація хмар

В атмосфері при конденсації вологи в повітрі виникають переохолоджені краплі та крижані кристали води. Скупчення цих продуктів конденсації називаються хмарами. В залежності від співвідношення в хмарах переохолоджених крапель та кристалів води ділять на три групи:

- Водяні (краплинні) хмари, що складаються тільки з переохолоджених крапель. Можуть існувати лише за температур вище -10°C .
- Крижані (кристалічні) хмари, що складаються тільки з крижаних кристалів. Здебільшого існують за температур нижче -30°C .
- Змішані хмари існують в багатьох варіаціях при будь яких значеннях температури з проміжку -30°C до -10°C а також за його межами.

У табл. 1.1. наводиться повторюваність різних типів хмар в різних температурних межах:

Таблиця 1.1

Хмари	Градація температури, $^{\circ}\text{C}$						
	0..-5	-5..-10	-10..-15	-15..-20	-20..-25	-25..-30	-30..-35
Переохолоджені краплинні, %	71.4	50.4	34.4	18.2	11.2	3.8	2.5
Змішанні, %	28.6	46.7	57.7	60.4	54.7	47.7	32.3
Кристалічні, %	—	2.9	7.9	21.4	34.1	48.5	65.2

Наприкінці 19 століття була прийнята міжнародна класифікація хмар. Ця класифікація являє собою поділ тропосферних хмар на роди, види, різновиди за додатковими ознаками із відповідними латинськими найменуваннями, прийнятими за міжнародною угодою. В Україні застосовуються також їхні українські еквіваленти.

Хмари можна класифікувати в різний спосіб:

- за висотою формування;
- за формою;
- внутрішньою будовою.

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Кожний рід хмар спостерігається у визначеному інтервалі висот (ярусі), що залежить від широти і наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Ярус	Тип	Висота у полярних широтах, км	Висота у помірних широтах, км	Висота у тропічних широтах, км
Верхній	Тип А	3 — 8	5 — 13	6 — 18
Середній	Тип В	2 — 4	2 — 7	2 — 8
Нижній	Тип С	до 2	до 2	до 2
Вертикальні	Тип D			

За формою хмарних утворень виділяється 10 родів хмар, що наведені в табл. 1.3:

Таблиця 1.3

Символ	Рід	Латинська назва
	Перисті	Cirrus (Ci)
	Перисто-купчасті	Cirruncumulus (Cc)
	Перисто-шаруваті	Cirrostratus (Cs)
	Високо-купчасті	Alto cumulus (Ac)
	Високо-шаруваті	Altostratus (As)
	Шарувато-купчасті	Stratocumulus (Sc)
	Шаруваті	Stratus (St)
	Шарувато-дощові	Nimbostratus (Ns)
	Купчасті	Cumulus (Cu)
	Купчасто-дощові	Cumulonimbus (Cb)

Наведена класифікація дозволяє формувати моделі накладання хмар, задавати основні характеристики їх поведінки та створити вичерпну бібліотеку для задоволення потреб моделювання СЕС.

Серед перерахованих типів хмарних утворень особливо цікаві для цілей дослідження і моделювання такі хмари, що мають не близький до нуля індекс прозорості, тобто в силу своєї структури не призводять до значних втрат енергії. Можна виділити такі групи:

- високо-шаруваті (As) – здебільшого тонкий, напівпрозорий шар хмарного покриву;
- перисті (Ci) – окремі білі хмари.
- перисто-купчасті (Cc) - малі, більш-менш повторювані плями та рябь хмар;
- перисто-шаруваті (Cs) – малий шар в значній мірі напівпрозорого шару хмарного покриву.

Перераховані типи хмарних утворень можуть значно зменшити виробіток енергії на станції, але адекватна їм система відбору максимальної енергії здатна подолати описані проблеми. Тобто ці хмари представляють інтерес саме для моделювання роботи систем відбору максимальної енергії.

1.3. Методи оцінки інтенсивності сонячного випромінення

Інтенсивність сонячного випромінення яке досягає поверхні атмосфери Землі сягає 1361-1362 Вт/м² та незначно змінюється в залежності від позиції на поверхні еліптичної орбіти.

При проходженні через атмосферу сонячне випромінення зазнає впливу під дією різноманітних процесів поглинання, дисперсії та відбивання, що спричинює зменшення інтенсивності сонячного випромінення. Вплив обумовлений компонентами атмосфери, наприклад озоном, вуглекислим газом, твердими чи рідкими частинками як от аерозолі чи водяна пара. Однак найбільш значною завадою на шляху сонячного проміння є хмарний покрив. У випадку проходження через таке явище змінюється не лише інтенсивність випромінення, а й спектральний склад випромінення, що досягає поверхні планети.

Сонячне випромінення що досягло поверхні Землі, тобто сумарне випромінення - це сума трьох компонентів: прямого випромінення (промені, які не зазнали значних змін при проходженні через атмосферу тож можуть бути представлені як отримані прямо від сонця), заломленого випромінення

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

(промені, які так чи інакше були заломлені або відбиті частками в атмосфері. Такі промені надходять на поверхню з усього небесного куполу). Третій компонент, яким нерідко нехтують, це відбите від поверхні землі чи близьких завад випромінення. Пряме випромінення зовсім не надходить на поверхню коли сонячний диск повністю закритий хмарами, в той час як заломлене випромінення наявне і в такому разі.

Сонячне випромінення за відсутності хмарного покрову та за умови чистої, сухої атмосфери є дуже важливим параметром оскільки надає інформацію про максимальну кількість сонячної радіації, яку можна очікувати в даній локації. Це значення зазвичай оцінюється дослідником та використовується як вхідний параметр в інших моделях для знаходження інтенсивності сонячного випромінення за звичайних атмосферних умов.

1.3.1. Оцінювання інтенсивності

Найточніший метод вимірювання сонячного випромінення – це наземні датчики. Але необхідно виконати ще кілька умов (окрім точності) щоб ці виміри були корисними:

- Повинні використовуватися лише високоякісні датчики.
- Виміри повинні проводитися часто (хоча б раз у годину).
- Датчики необхідно регулярно калібрувати та очищати.
- Отримані дані повинні бути доступні довгий проміжок часу (краще від 10 років).

Кількість наземних датчиків, які відповідають цим вимогам на даний момент відносно мало, а самі станції розташовані на великих відстанях одна від одної. Через це використання даних із супутників стає все більш популярним методом оцінювання сонячного випромінення, яке потрапляє на поверхню Землі. Більшість сучасних методів отримує дані з геостаціонарних метеорологічних супутників. Цей підхід має такі переваги:

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

- Дані про сонячне випромінення наявні для всієї площі земної поверхні, яку охоплює супутник. Наприклад супутники METEOSAT покривають Африку, Європу та більшу частину Азії з типовою роздільною здатністю зображення в декілька кілометрів.

- Зазвичай наявні дані за періоди навіть в 30 років.

Головним недоліком використання таких даних є неточність обрахунку інтенсивності сонячного випромінення на поверхні землі, для чого використовують складні математичні алгоритми з низкою параметрів, які не можна отримати із даних супутника.

Окрім того, деякі умови можуть призвести до значних втрат у точності обрахунків. Так, алгоритми обробки зображень часто приймають сніг за хмари. Не дивлячись на це, точність сучасних обрахунків на основі зображень із супутника задовільна.

Іншим джерелом даних про сонячне випромінення є Climate Reanalysis Data. Дані для повторного аналізу отримують з чисельних моделей прогнозування погоди.

На виході таких моделей часто наявний параметр інтенсивності сонячного випромінення на поверхні землі. Деякі з наборів даних є глобальними і охоплюють навіть полюси, дані про які відсутні у моделях на базі супутників.

Серед недоліків таких даних слід відмітити низьку роздільну здатність (порядку 30 км), низька порівняно з супутниковими моделями точність. Для проекту PVGIS 5 було проведено повторний аналіз даних із двох джерел: ECMWF ERA-5 та COSMO-REA.

Перевірка даних повторного аналізу з різних джерел проводилася з допомогою наземних станцій. Результат показано на рис. 1.2 де шкала показує середнє відхилення річного сонячного випромінення.

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

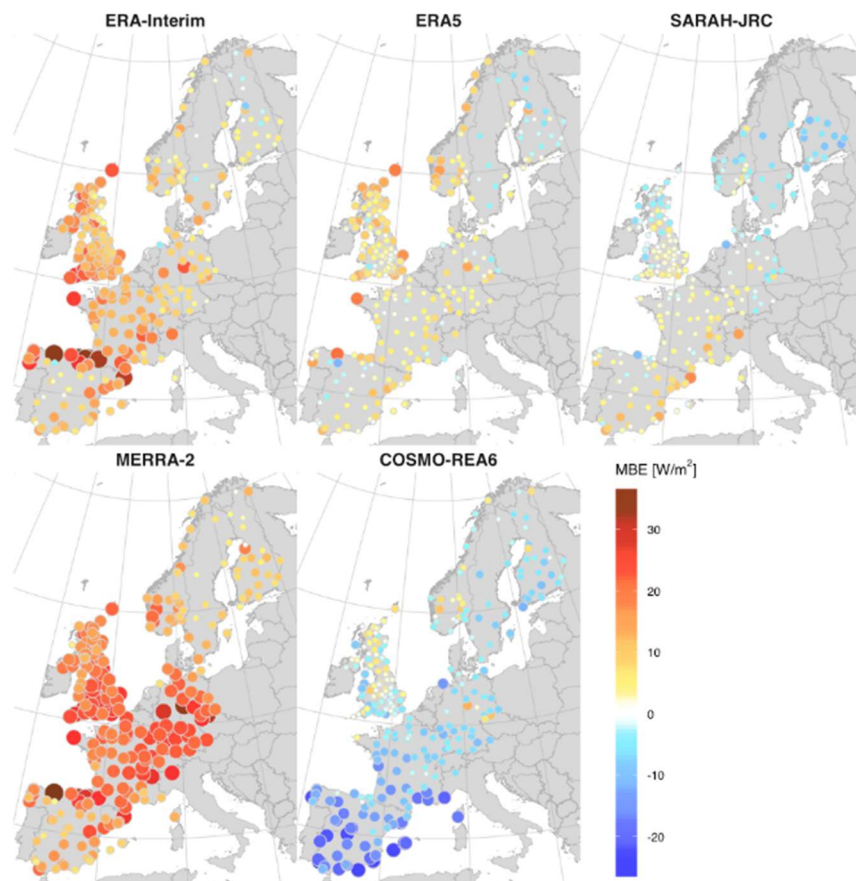


Рис.1.2. Результат перевірки даних про сонячне випромінення

Також порівнювалися дані ERA-5 та COSMO-REA з даними із супутників. На рис.1.3 показана різниця у відсотках. Ці порівняння представляють більший інтерес оскільки працюють саме з даними, які далі в цій роботі буде запропоновано використовувати в якості основи для будування моделей хмарного покритву. Проведений авторами цих робіт аналіз показує, що при використанні даних з подібного роду джерел необхідно враховувати похибку методу, яким будували карти (інтенсивності випромінення, індексів хмарності, або ж індексів прозорості атмосфери), оскільки ця похибка часто або занижує більшість значень, або завищує їх.

Загалом на основі таких мета-аналізів будуть «врівноважені» моделі, тобто такі, що з декількох джерел однотипних даних намагаються будувати більш точні карти.

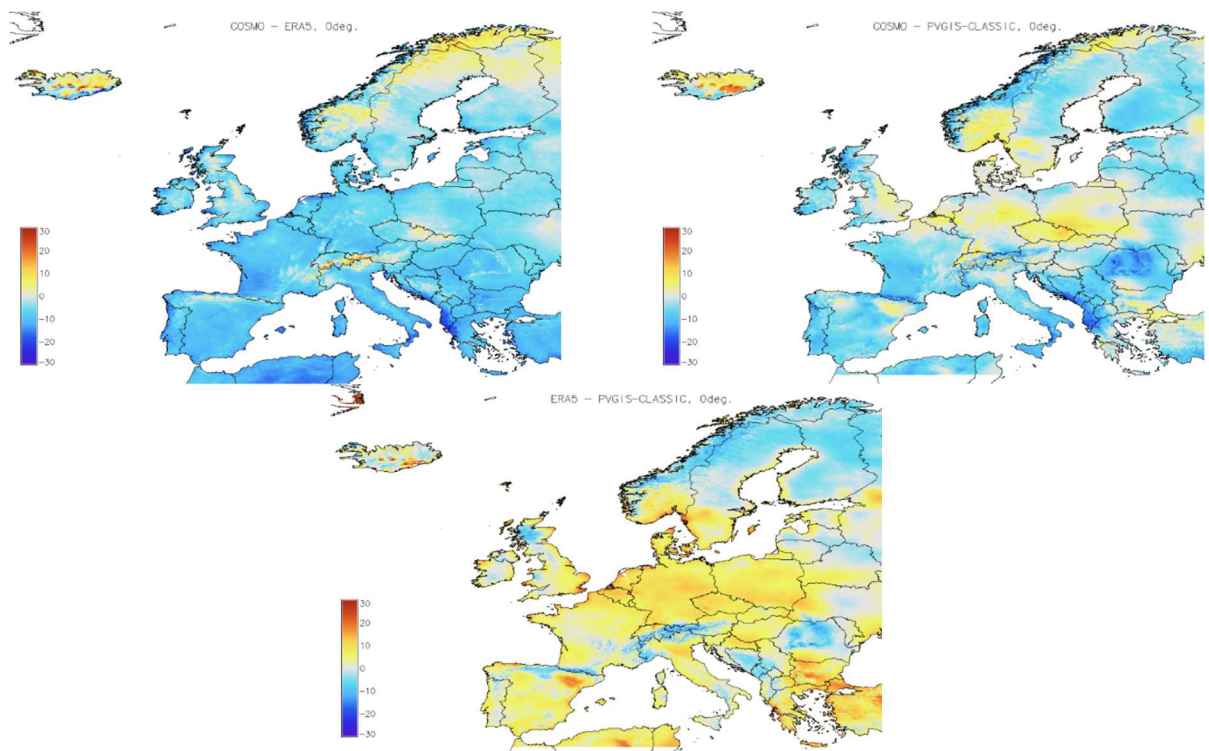


Рис. 1.3. Результат перевірки даних про сонячне випромінення

1.3.2. Розрахунок інтенсивності за даними супутника

Перш за все в розрахунках необхідно оцінити вплив хмарного покриву на сонячне випромінення. Хмари відбивають та поглинають сонячні промені, так що менше сонячної радіації потрапляє на поверхню землі.

Відбиваюча здатність хмар обраховується спостереженням за однією і тією ж ділянкою в один і той же час кожен день на протязі місяця. Після робиться припущення що найтемніший із спостережених варіант відповідає безхмарному небу. Для всіх інших днів показник відбивання хмар обраховується відносно до цього «безхмарного дня». Потім операція виконується для кожної години. Таким чином можна отримати деяке ефективне альбеда хмари. На рис. 1.4. показано як просте зображення з супутника перетворюється в карту хмарного покриву при обробці описаним методом.

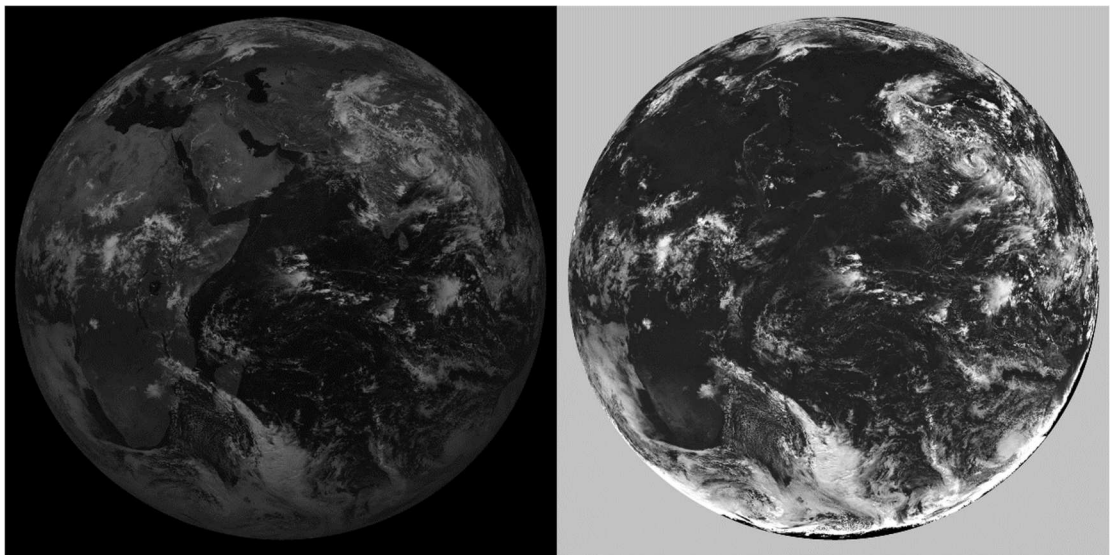


Рис. 1.4. Приклад роботи типового алгоритму обробки зображень з супутника

На другому етапі розрахунків оцінюється інтенсивність сонячного випромінення на поверхні землі за безхмарних умов. Для цього використовується теорія теплообміну випроміненням в атмосфері разом з даними про аерозолі, водяну пару та озон в цій місцевості. Після цього інтенсивність у відповідні моменти часу може бути отримана з даних про альбедо хмар та інтенсивності за безхмарних умов.

Проведена вище перевірка даних демонструє загалом прийнятну роботу алгоритму. Необхідно зауважити, що в деяких випадках, які непередбачені безпосередньо в схемі розрахунків, метод може призводити до значних спотворень (наприклад наявність снігу, який може бути прийнятий за хмари, або буряни який спроможний підняти в атмосферу значну кількість аерозолів).

Перевірка даних

Представляється важливим більш детально описати процес перевірки даних, отриманих моделлю. Як було вже зазначено, отримані дані порівнюються з наземними вимірами. Низка наукових робіт присвячена перевірці моделі PVGIS [14][15][7][5].

1.3.3. Обчислення інтенсивності на нахиленій поверхні

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Описані вище розрахунки на основі даних із супутника дозволяють отримати значення сумарного та прямого випромінення на горизонтальну площину як для всього спектру, так і розподілене по спектру. Однак модулі та PV системи зазвичай установлені під таким кутом до горизонтальної площини, щоб зібрати максимальну кількість енергії. Таким чином обраховані значення виявляються непридатними для використання.

На сьогодні розроблено кілька моделей, які використовують дані про величини сумарного та прямого випромінення на горизонтальну поверхню для оцінки прямого та заломленого випромінення на нахилену поверхню. Сумарне випромінення на нахилену поверхню знаходиться як сума двох наведених величин.

Пряме випромінення на нахилену поверхню легко оцінити знаючи відповідне значення для горизонтальної поверхні та положення сонця на небі. Навпаки, заломлене випромінення важко оцінити оскільки на нахилену поверхню потрапляє відбите проміння з частини небесного куполу та потрапляє більше заломленого випромінення з поверхні землі та прилеглих об'єктів.

В залежності від того, як визначається це заломлене випромінення, моделі оцінювання діляться на дві головні категорії: ізотропні та анізотропні [5]. Перша група моделей робить припущення про рівномірний розподіл заломленого випромінення по небесному куполу, подібно до ситуації, коли все небо закрито хмарами. В таких моделях заломлене випромінення на нахилений поверхні залежить лише від того, яку частину небесного куполу видно з цієї нахиленої поверхні. Але очевидна практична неможливість такої ситуації. Навіть на захмареному небі є ділянки з більшою яскравістю. В основному, анізотропні моделі оцінюють підвищену яскравість в околі кута зеніту чи горизонту. Ці моделі можна розбити на дві групи в залежності від кількості областей окрім ізотропного фону, чи вони описують окіл сонця на небі, чи описують з горизонт.

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Зараз часто використовується (в PVGIS, наприклад) анізотропна двокомпонентна модель, розроблена [16]. Побудована вона за схожим принципом, використаним в трьох компонентних моделях розробленими. Перша модель показала найточніші значення в дослідженні ESRA (2000). Модель чітко розрізняє чисте та захмарене небо, освітлені та затемнені поверхні.

Вплив тіні від прилеглих об'єктів. В місцях біля висот, гір можливі періоди коли сонце знаходиться за цими об'єктами, так що сонячне випромінення буде меншим за те, що надходить від сонця та хмар згідно з моделлю. Сучасні системи використовують інформацію про висоту поверхні над рівнем моря з роздільною здатністю близько 90м. З цих даних розраховується висота горизонту навколо кожної географічної локації. Результат розрахунків дозволяє отримати приблизно періоди, коли поверхня знаходиться в тіні висот. Для таких ділянок сонячне випромінення обраховується з урахуванням лише заломленої частини випромінення.

1.3.4. Обчислення потужності PV модулів

Хоча кількість сонячного випромінення, яке надходить на PV модулі, є найважливішим параметром, наявні ще кілька факторів, які необхідно враховувати. Перш за все, це номінальна потужність PV модулю, виміряна за стандартних умов (згідно з інтернаціональним стандартом IEC-60904-1). Але реальні умови експлуатації цих модулів значно відрізняються від стандартних, тож необхідно врахувати невідповідності для оцінки реальної вихідної потужності PV модулів.

Деяка частина випромінення не потрапить на модуль будучи відбитою. Частина відбитого випромінення тим більша, чим гостріший кут падіння променю на панель. Із нещодавніх робіт математична модель цього процесу описується в [12]. В основному, цей ефект спричинює втрати в 2-5% сонячного випромінення. На рис. 1.5 наведена карта с відображенням відсотків втраченого випромінення для модуля, який нахилено під кутом 20° .

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

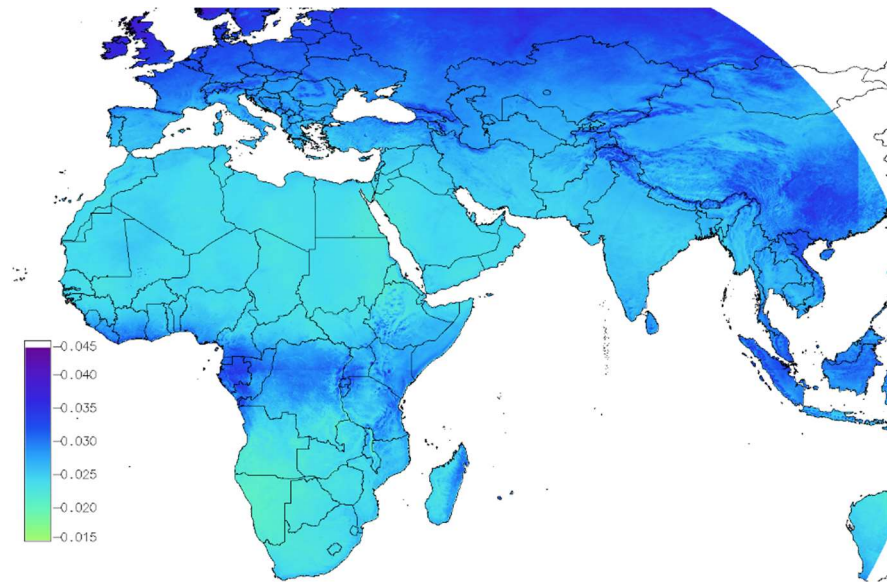


Рисунок 1.5. Вплив відбиття променів під гострим кутом на втрати енергії

1.3.5. Спектральний склад випромінювання

Також важливим є ефект спектральних змін у сонячного випромінювання. PV модулі чутливі лише в деякій смузі довжин хвиль випромінювання. Параметри цієї смуги залежать від типу самого модулю. На рис. 1.6. наведені спектральні характеристики декількох PV технологій. Частина з наведених чутлива як до видимого спектру, так і до інфрачервоного.

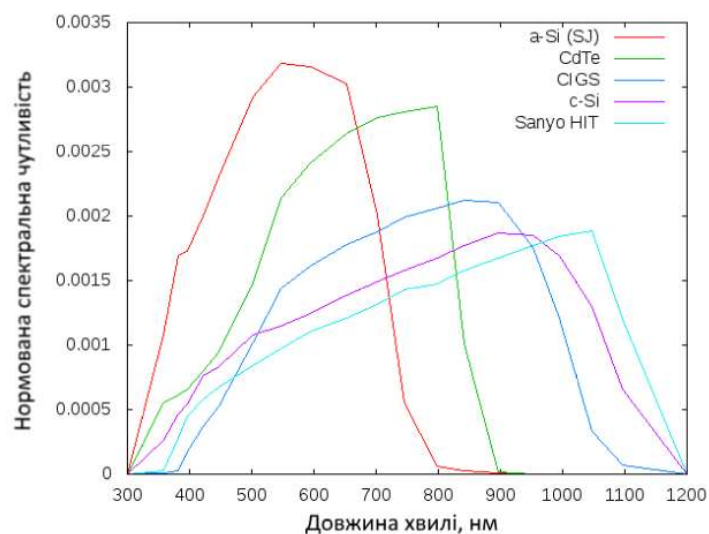


Рис. 1.6. Спектральні характеристики

Спектральний склад сонячного випромінення змінюється з плином дня та з метеорологічними умовами. Відомо, що сонячне світло більш червоне на сході та заході сонця. Також встановлено, що хмари краще поглинають червоне світло. Це означає, що тужність PV модулів залежить від спектру сонячного випромінення. Сучасні системи здатні надати дані про спектральний склад випромінення.

Ефективність PV модулів залежить від температури самого модуля та від сонячного випромінення. В основному ефективність зменшується зі збільшенням температури. Сила цього ефекту залежить від PV технології. Для більшої частини модулів, ефективність майже постійна для інтенсивностей випромінення від 400 до 1000 В/м², але для менших ефективність знижується. Зауваживши, що стандартні умови характеризуються високою інтенсивністю випромінення (1000В/м²) та незначною температурою (25ОС), стає очевидним той факт, що для більшої частини поверхні землі середня ефективність модулю менше ефективності, виміряної на заводі. На рис. 1.7. показані залежності ефективності від інтенсивності випромінення та ефективності від температури модуля.

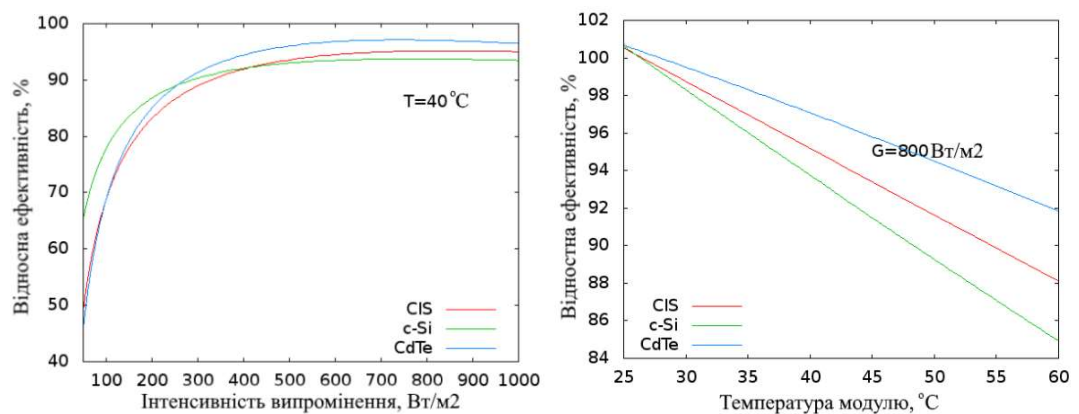


Рис. 1.7. Залежності ефективності від (а) інтенсивності випромінення, (б) температури модулю

Зміна температури PV модулю потребує більш детального аналізу. Це пов'язано з тим, що модуль під дією сонячного випромінення буде нагріватися

до температур вищих за температуру навколишнього середовища. Більш того, швидкість обміну теплом між навколишнім середовищем та модулем залежить як від температури повітря, так і від швидкості вітру. Так, модель запропонована в [3] розраховує температуру модуля за формулою:

$$T_m = T_a + G / (U_0 + U_1 \cdot W) \quad (1.1)$$

де T_a – температура повітря, а W – швидкість вітру. Коефіцієнти U_0 , U_1 пропонується оцінювати за емпіричними даними. На рис. 1.8. зображено карту, яка показує середньорічну відносну ефективність роботи PV модулю з урахуванням усіх описаних чинників.

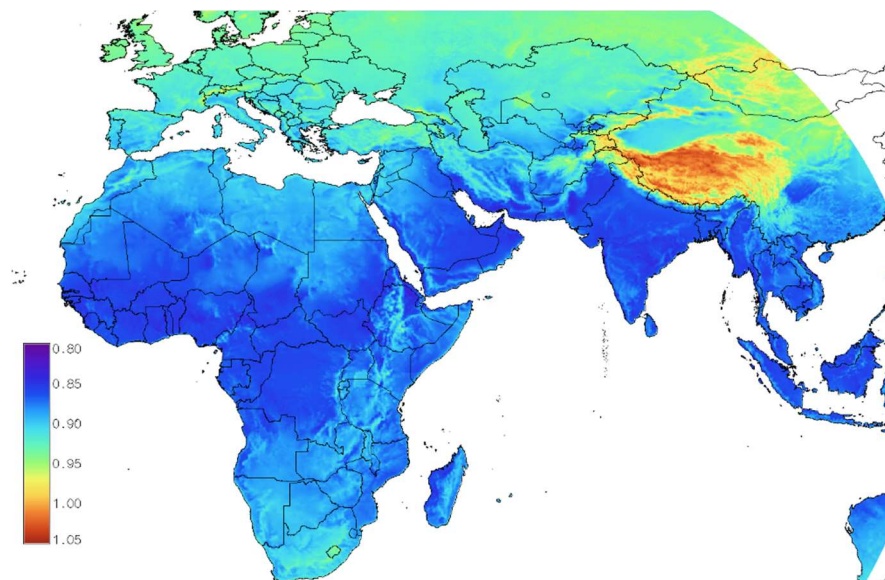


Рис. 1.8. Середньорічна відносна ефективність роботи модулів

Системні втрати являють собою втрати, обумовлені лише індивідуальними факторами як то структура СЕС, чи втрати в перетворювачах. Також необхідно враховувати втрати в потужності модулів через старіння. Так, було встановлено що за один рік експлуатації потужність модулю знижується на 0.5%. Тобто через 20 років використання потужність буде орієнтовно 90% від заявленої.

2. МОДЕЛЬ ХМАРНОГО ПОКРИВУ

Структурно роботу програми можна розділити на такі етапи:

- 1) Обробка зображень хмарного покриву. На цьому етапі формуються дані, які потім будуть використані для моделювання зміни інтенсивності випромінення на СЕС.
- 2) Створення інтерполяційної сітки з отриманих на кроці 1) даних.
- 3) Формування масиву значень, які представляють просторове розміщення сонячних панелей (фотоелементів).
- 4) Подання цього масиву на інтерполяційну сітку з урахуванням їх просторового розміщення.

Також необхідно окремо відзначити необхідність створення моделі сонячної панелі (фотоелементу). Оскільки в реальних СЕС наявні в деякій мірі інерційні процеси, то в подальшому треба враховувати їх при розрахунках. Для даної ж моделі пропонується лише вказувати не занадто малі кроки моделювання щоб отримані результати в більшій мірі відповідали дійсності. Кожен з перерахованих пунктів детально розглянуто в цьому розділі.

2.1. Кут падіння сонячного проміння

Важливим питанням є зміна з плином часу інтенсивності випромінення, а саме так званого *глобального горизонтального випромінення*. Так вже було наведено ряд ключових факторів, які впливають на цей показник. Вирішальну роль має кут падіння сонячного проміння на горизонтальну поверхню землі. При цьому кут падіння променів має виражену залежність і від позиції на поверхні земної кулі, і від години дня, і від дня в році. Чимало робіт присвячені визначенню або цього кута, або аналізу даних про глобальне горизонтальне випромінення [19][9].

Хоча в даній роботі такі фактори не враховані, проте можливість їх врахування передбачена за допомогою введення єдиної змінної GHI (global

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

horizontal irradiance). Тобто побудова будь-якої моделі зміни GHI з часом зводиться до маніпулювання значенням цієї змінної. На рис. 2.1 наведено пояснювальну схему до використаних в цій роботі термінів.

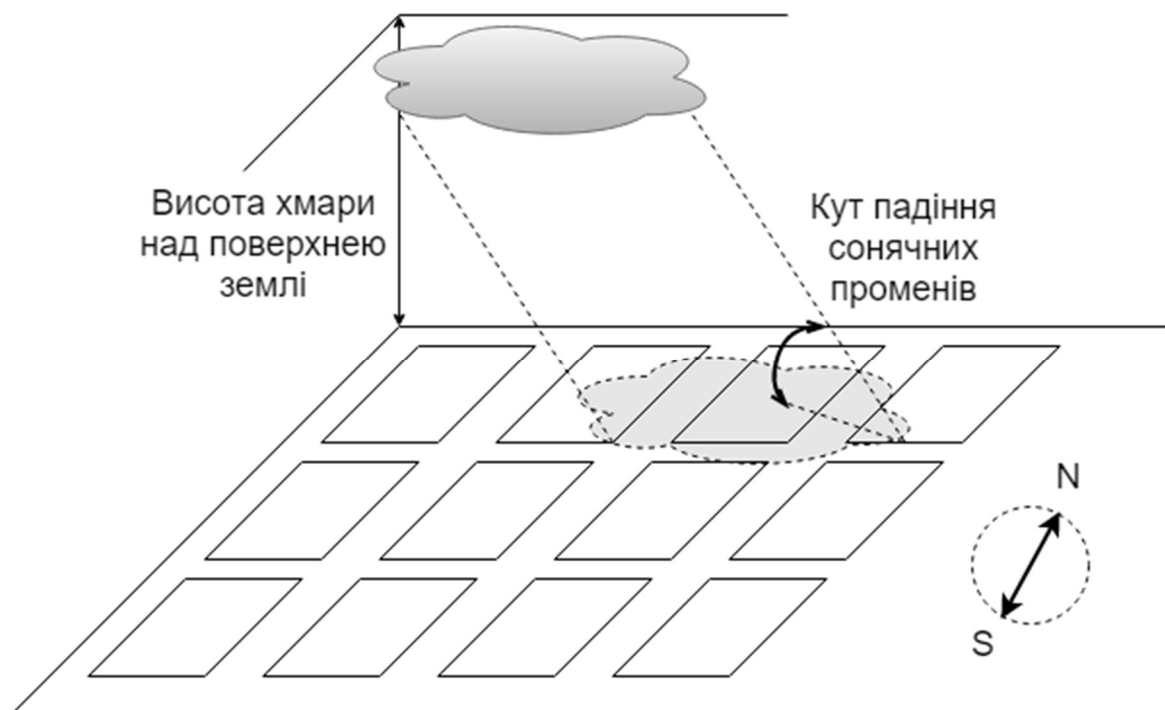


Рис. 2.1. Схематичне зображення моделі процесу проходження хмари над площиною сонячної електростанції

На рис.2.2 наведено приклад залежності теоретично передбаченої та виміряної інтенсивності від кута падіння сонячних променів. Визначення такої залежності прямими вимірами значно ускладнене нерівномірністю розподілу індексу прозорості атмосфери, зокрема непостійністю хмарного покриву, як одного з найвпливовіших факторів.

Тобто в даному випадку необхідно використовувати значення, отримані з виключно теоретичної моделі з оглядом на значення, отримані прямими вимірами [19].

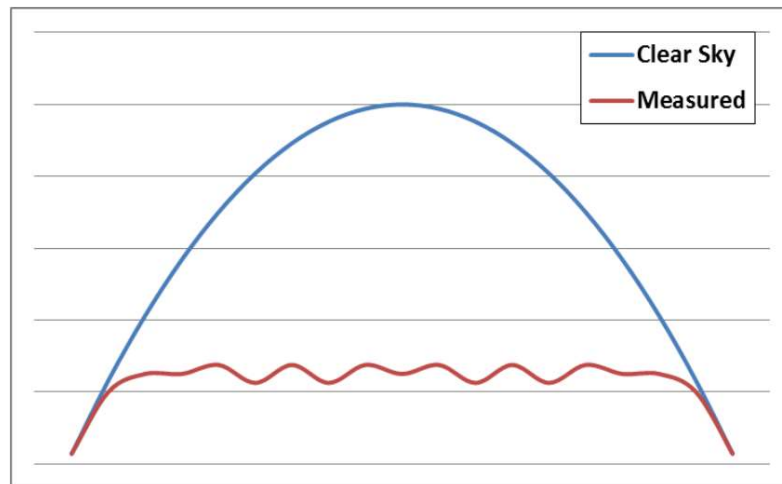


Рисунок 2.2. Приклад співвідношення виміряної (Measured) інтенсивності до теоретично передбаченої (Clear Sky – за умови чистого неба)

2.2. Модель хмари

2.2.1. Обробка зображень хмарного покриву

В основі імітаційної моделі лежить припущення, що хмари мають «фрактальну природу» [11]. Через це вважається доцільним використання алгоритму diamond-square [10] для генерації «самоподібних» структур – фракталів. (Для визначення поняття фракталу, [11])

Алгоритм починається з задання масиву з довжиною та висотою $2n+1$. Далі задаються 4 початкових значення по краям масиву. Подальшу роботу алгоритму можна розбити на два повторюваних кроки. Перший полягає в тому, що для кожного квадрату в масиві значення центрального елементу визначається як арифметичне середнє від суми чотирьох кутових значень (рис. 2.3(a)).

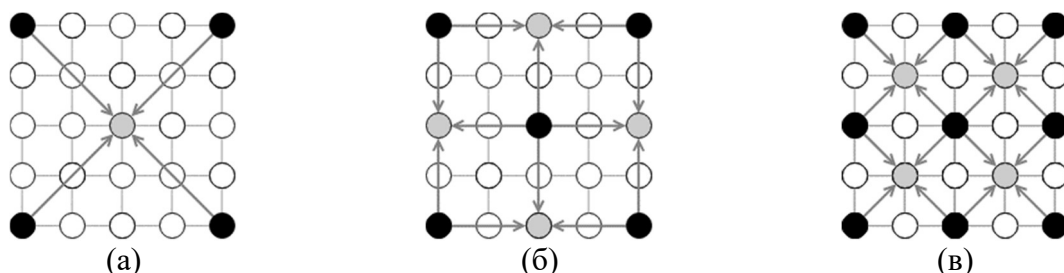


Рис. 2.3. Ілюстрації до алгоритму diamond-square: (а, в) – перший крок, (б) – другий крок.

Другий крок, в свою чергу, використовує отримане на попередньому кроці значення щоб отримати кутові значення для нових квадратів як середнє арифметичне від суми відповідних елементів (рис. 2.3(б)).

Але щоб отриманий фрактал можна було використовувати для імітації реальних природних об'єктів необхідно ввести випадкову складову. Алгоритм, запропонований у роботі [10], визначає цю складову як реалізацію випадкової величини з рівномірним законом розподілу Гауса помножену на коефіцієнт кроку, заданий наступним виразом (показник Херста):

$$\sigma_i = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \sigma_0 \cdot 2^{-H \cdot i}, \\ \sigma_0 \cdot 2^{-H \cdot i}; \end{cases} \quad (2.1)$$

де $\sigma_0 = 1$ – стандартне відхилення для розподілу Гауса, i – номер кроку алгоритму. H – величина, зв'язана з фрактальною розмірністю хмари D [17]:

$$D = 2 - H.$$

Визначена декількома методами величина фрактальної розмірності D [11], зокрема аналізом зображень з супутника, знаходилася в межах числових значень від 1.4 до 1.6. В [10] запропоновано и обгрунтовано використання значення $H = 0,5$ для усіх масштабів.

Для зазначених раніше цілей доцільно представити значення масиву як значення прозорості атмосфери k^* . Цей показник визначається як: $k^* = G/G_{CS}$, де G – інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні, а G_{CS} – очікувана інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні землі в безхмарну погоду. Оскільки G_{CS} необхідно обраховувати для конкретної місцевості і отримати точне значення навіть прямими вимірюваннями неможливо, то його значення здебільшого занижене. Це приводить до того, що k^* може приймати значення більші за 1. Зі зміною методу розрахунку G_{CS} необхідно змінювати і спосіб розрахунку k^* . Наприклад в [8] було отримано в результаті аналізу даних за 10 років спостережень емпіричні формули:

$$k^* = 1 - 0.75 \left(\frac{N}{8} \right)^{3/4}; G_{CS} = 910 \sin \theta_e - 30.$$

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

де N – окти, а θ_e – це висота сонця над горизонтом (0-90°). За допомогою N кількісно оцінюють хмарність неба [13]. 0.75 – середнє значення коефіцієнту форми хмари, який, наприклад, для перистих хмар становить 0.39.

Отримані в результаті виконання алгоритму значення подані через показник хмарності (n). Ці данні запропоновано переводити [10] в індекс прозорості атмосфери за наступною формулою:

$$k^* = \begin{cases} 1.2, & n \leq -0.2, \\ 1-n, & -0.2 < n \leq 0.8, \\ 1.1661-1.7814n+0.725n^2, & 0.8 < n \leq 1.05, \\ 0.09, & n > 1.05. \end{cases} \quad (2.2)$$

Перетворений згідно з (2.2) масив даних показано на рис. 2.4. Модифікований алгоритм дозволяє отримувати «поверхню» фрактальної природи, яка і представляє собою імітаційну модель хмари.

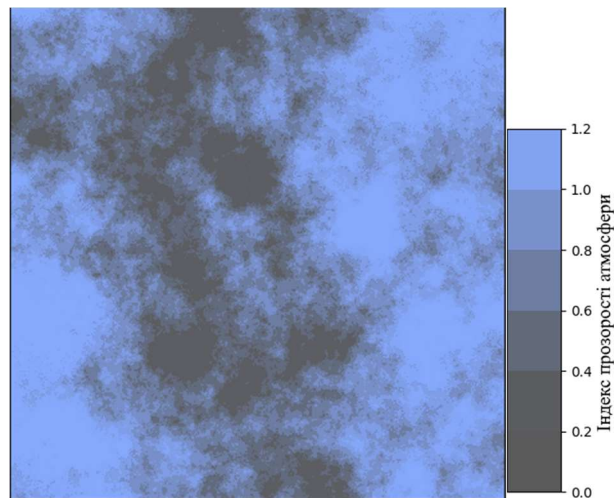


Рис.2.4. Масив, розмірністю 1025 на 1025 елементів з індексів прозорості атмосфери, представляє собою генеровану хмару

Зі структури алгоритму diamond-square видно, що кількість початкових точок може відповідати наступному виразу: $(2^k + 1)^2, k \geq 0$. На рис. 2.5(а) подано «шаблон» - масив значень індексу хмарності. Цей масив передано в алгоритм diamond-square. В результаті отримано масив розміром 1025 на 1025 з індексів прозорості атмосфери (рис. 2.5(б)).

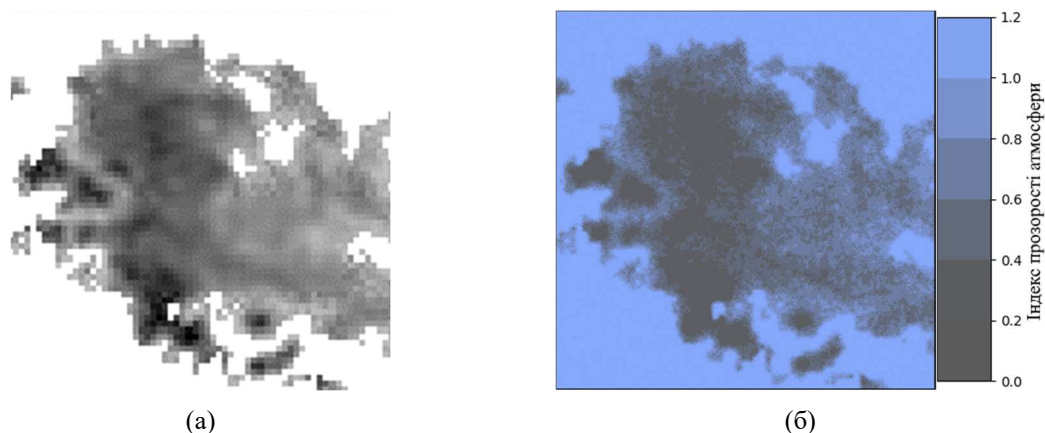


Рис. 2.5. Масив, що було (а) передано в алгоритм та (б) отримано після виконання алгоритму

Тобто роздільна здатність збільшена в 250 разів. При цьому є можливість уточнювати параметри алгоритму прямими спостереженнями.

2.2.2. Створення інтерполяційної сітки

Хоча розглянутий алгоритм дозволяє підвищувати роздільну здатність отриманих зображень, цього недостатньо для моделювання хмарного покриву з урахуванням просторового розміщення. Для вирішення поставленої задачі запропонована апроксимація наданих значень радіальними базисними функціями. З поміж інших варіантів двовимірної апроксимації, апроксимація радіальними базисними функціями виділяється точністю через те, що демонструє хороші результати на рівномірно розподілених даних. Отримане зображення хмари є яскравим прикладом таких даних – сітки значень. Крім того, для апроксимації радіальними базисними функціями не треба додаткової інформації щодо зміни значення функції (індексу прозорості атмосфери) зі зміною аргументу (точки в просторі).

З поміж недоліків цього методу є такий важливий пункт як складність розрахунків. Тому пропонується також звернути увагу на те, що обробка даних на першому кроці алгоритму дозволяє отримати наскільки завгодно деталізоване зображення хмарного покриву. Це робить лінійні методи апроксимації досить хорошим вибором. Зокрема буде розглянуто вибір так

званого «ядра» радіальних базисних функцій у вигляді лінійної функції відстані.

Радіальні базисні функції – це ціла низка жорстких методів інтерполяції, тобто побудована функція буде проходити через усі опорні точки. Радіальна базисна функція – це функція із набору радіальних функцій, що використовуються для апроксимації заданої функції. Радіальна ж функція є будь-яка функція, що залежить лише від відстані до так званого центру (точка c):

$$\varphi(x, c) = \varphi(\|x - c\|)$$

Для апроксимації функцій розраховують коефіцієнти лінійної комбінації радіальних базисних функцій:

$$y(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \varphi(\|x - x_i\|)$$

До особливостей методу також відноситься згладжування функції. Тобто припущення полягає у тому, що функція не має значних стрибків. Оскільки в якості об'єкту дослідження виступає хмарний покрив, то таке припущення не є сильним. Для розрахунку коефіцієнтів лінійної комбінації радіальних базисних функцій використано метод найменших квадратів. Проведено перехресний аналіз двох радіальних функцій: лінійної та мультіквадрик. Для порівняння з початкової сітки розміром 1024x1024 було сформовано сітку 65x65. Отриманий масив було використано для побудови двох моделей. На прикладі зображення на рис. 2.6 було виявлено, що середня похибка обрахунків проміжних значень сітки у випадку лінійних радіальних базисних функцій в 2,5 разів більша за мультіквадрик, але в обох випадках складає соті долі відсотка. Проте максимальне відхилення значень для лінійної моделі складають близько 5%. 1.5% відповідно для мультіквадрика.

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28



Рис. 2.6. Зображення, використане для порівняння роботи методу на основі різних радіальних базисних функцій

У [18] стверджується, що Гаусова радіальна базисна функція показує добрі результати при моделюванні навколишнього середовища. Незважаючи на це в даній роботі використовується саме лінійна модель оскільки обрахунки на її основі набагато простіші. За наявності реальних даних вбачається необхідним проведення порівняльного аналізу перерахованих методів апроксимації та перевірку їх узгодженості з наведеним раніше алгоритмом diamond-square.

При використанні цього методу треба зауважити, що загалом він не вирішує ряд більш загальних питань. Так, на відміну від байесівських методів які моделюють щільності ймовірностей кожного класу, метод призначений описати лише конкретне зображення і результати його виконання не можуть бути використані для подальшого аналізу та отримання інформації щодо об'єкту дослідження.

2.3. Модель сонячної панелі

2.3.1. Представлення характеристик панелей

Оскільки в якості мови програмування було обрано Python, то необхідно врахувати особливості. Через це поле сонячних панелей зручно представляти

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

не як масив об'єктів деякого класу, а як серію масивів кожен з яких відповідає за деяку характеристику панелі. В роботі з параметрів, якими характеризується кожна панель в будь який момент часу, враховуються такі як просторове розміщення та інтенсивність сонячного випромінення.

В програмі реалізована проста функція розміщення панелей на полі. Враховуються такі параметри як ширина (w) та висота (h) панелі, відстань між панелями по вертикалі (w') та по горизонталі (h'), кількість послідовно включених панелей у ряду (n), кількість таких рядів у групі панелей (m), кількість груп панелей (k).

На рис.2.7. показано як просторово розміщуються панелі за даним алгоритмом. Серія панелей з n штук (seria of panels), включені паралельно серії панелей з m штук (panel group), та розташовані у ряд k груп панелей ($A1 - Ak$). Відстані між панелями різних груп такі ж як і всередині групи.

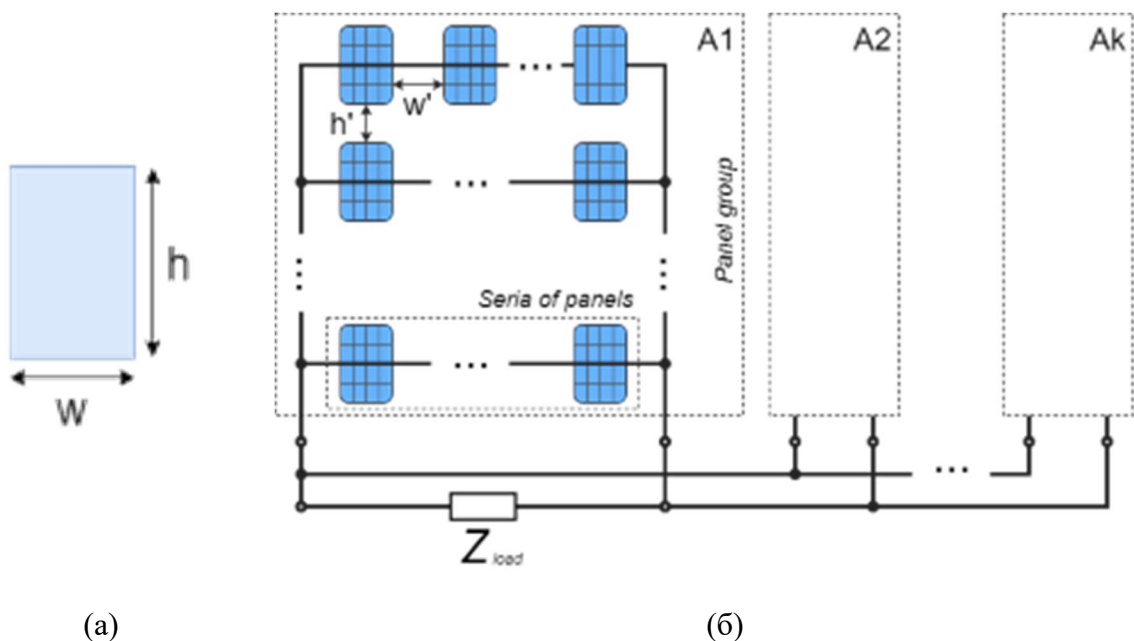


Рис.2.7. Показано параметри просторового розміщення панелей за реалізованим алгоритмом. Параметри панелі (а) та сонячної електростанції (б)

Хоча для моделювання проходження хмари на сонячною електростанцією схема розміщення є придатною, але необхідно включити більше варіантів для врахування особливостей місцевості та розширення

з'єднання панелей між собою. Питання може бути вирішено створенням повноцінного редактора розміщення і з'єднання панелей, але це виходить за рамки даної роботи.

Оскільки в даній структурі не враховується кут повороту панелей відносно одне одної, то запропоновано розраховувати значення інтенсивності лише в одній точці панелі. На рис. 2.8. показано з яких складових формується відстань між точками панелей, у яких обчислюється інтенсивність сонячного випромінювання.

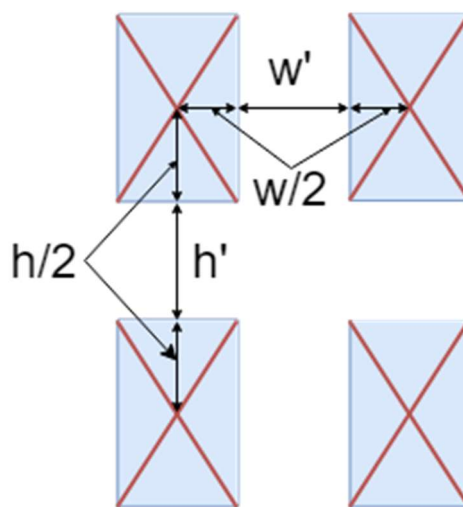


Рис. 2.8. Відстані між точками, для яких розраховується інтенсивність сонячного випромінювання

З урахуванням структури сонячної електростанції запропоновано будувати сітку значень $n \cdot k$ на m елементів з кроком $w + w'$ по горизонталі та $h + h'$ по вертикалі і початковими значеннями $w/2$ та $h/2$ щоб фіксувати ці точки в центрі панелей. Загальні формули для просторового розташування панелі i -го стовбця j -ї строки наведена нижче:

$$s_{i,j} = (x_i; y_j) = (i \cdot [w + w'] + w / 2; j \cdot [h + h'] + h / 2) \quad (2.3)$$

В рамках роботи також необхідно знаходити міру освітленості кожної з панелей. Для цього кожне з отриманих значень, які характеризують положення панелі в просторі, необхідно подати в функцію апроксимації прозорості атмосфери.

При цьому враховується положення хмари відносно сонячної електростанції. На рис.2.9. наведено використане розташування, яке було покладено в основу виведення формул руху проекції хмарного покриву відносно сонячної електростанції.

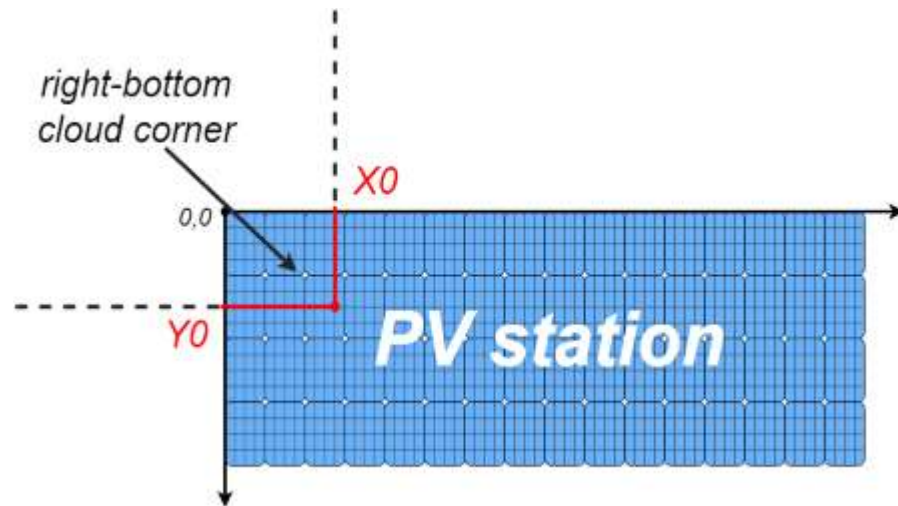


Рис. 2.9. Положення проекції хмарного покриву відносно сонячної електростанції

Формула приведена лише для горизонтального розташування кожної панелі. Для вертикального розташування формула повторюється з точністю до відповідних характеристик, тобто де була горизонтальна протяжність хмари, стає вертикальна і т.д. Тож для кожного значення масиву просторового розміщення панелей необхідно провести наступну операцію перед передаванням цього значення в апроксимуючу функцію індексу прозорості хмарного покриву:

$$x_m = w - (x_c - x_i), \forall i,$$

де w – горизонтальна протяжність хмари, x_c – положення правого нижнього краю хмари на полі сонячної електростанції, x_i – положення точки панелі, для якої обраховується значення інтенсивності сонячного випромінювання по горизонталі. Отримане x_m відповідно і буде шуканою точкою вже на площі проекції хмари.

Для точок, які не потрапили на зображення проекції хмари, значення інтенсивності являється «опорним». В реалізованій версії програмного середовища це значення складає 1000 Вт/м² і не може модифікуватися. Це, по

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

суті, суттєве обмеження оскільки в основі методу розрахунку індексів хмарності є положення про максимальну інтенсивність сонячного випромінення для конкретної місцевості у конкретний час. В наступних версіях програмного забезпечення необхідно надати змогу обирати це значення, задавати залежності від часу. Також необхідно використовуючи роботи, посилання на які наведено в пункті 1.3 надавати орієнтовні дані для обраної місцевості автоматично.

2.3.2. Засоби роботи з моделлю

Наведений вище приклад роботи з даними не є вичерпним для потреб моделювання. Інтенсивність сонячного випромінення, дані про навантаження, температуру необхідно оброблювати у відповідності до типу використаних панелей. Інкапсуляцію необхідних функцій та даних проведено за допомогою створення класу *Тип сонячних панелей*.

В якості моделі сонячної панелі (елементу) було використану спрощену схему наведеної у [23]. Еквівалентна схема показана на рис.2.10.

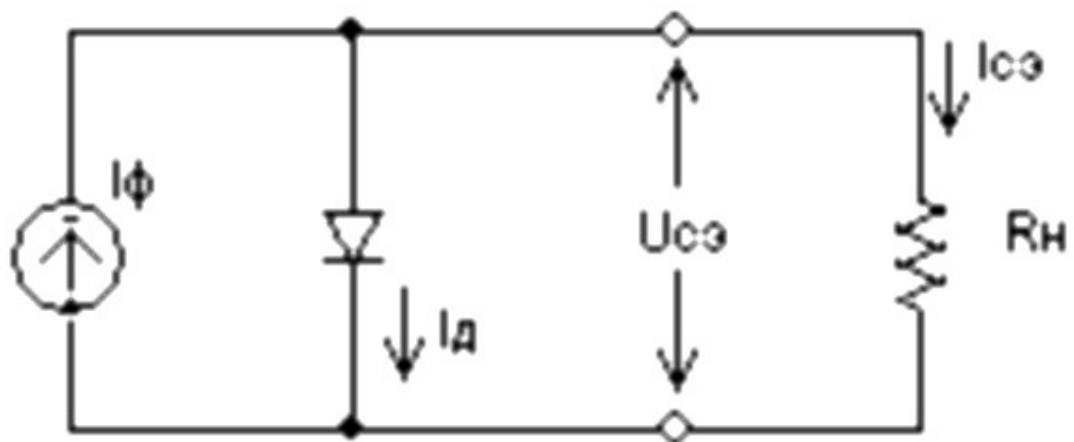


Рис. 2.10. Еквівалентна схема фотоелектричного елемента

Складовими елементами схеми є джерело струму та діод. Джерело струму моделює виникнення в елементі фотоструму I_ϕ під дією освітлення. Діод включено в прямому напрямку паралельно джерелу струму. Під дією прямого зміщення через наявність надлишкових концентрацій електронів в n-

області елемента та надлишкових концентрацій дірок в його р-області через діод протікає деякий струм I_d . Рівняння ВАХ такої моделі описується наступним виразом:

$$I_H = I_\Phi(W) - I_0 \cdot \left[e^{qU_H/kT} - 1 \right],$$

де I_H , U_H – струм і напруга навантаження фотоеlementу, I_Φ – фотострум в елементі, який залежить від інтенсивності W падаючого освітлення, I_0 – зворотній струм насичення, T – абсолютна температура, q – заряд електрону, k – постійна Больцмана. Але у випадку моделювання роботи цілої панелі деякі з цих параметрів втрачають сенс, тому запропонована модель, яка менш чутлива до масштабу параметрів для побудови ВАХ:

$$U_H = \alpha \cdot \ln(\beta \cdot [I_\Phi(W) - I_H] + 1), \quad (2.4)$$

Так, для сонячної панелі *Prolog Semicor Ltd PSm-90* із наявної бібліотеки були отримані значення:

$$\alpha = 1.315,$$

$$\beta = 5.56 \cdot 10^6.$$

Побудована за виразом (2.) ВАХ подана на рис.2.11.

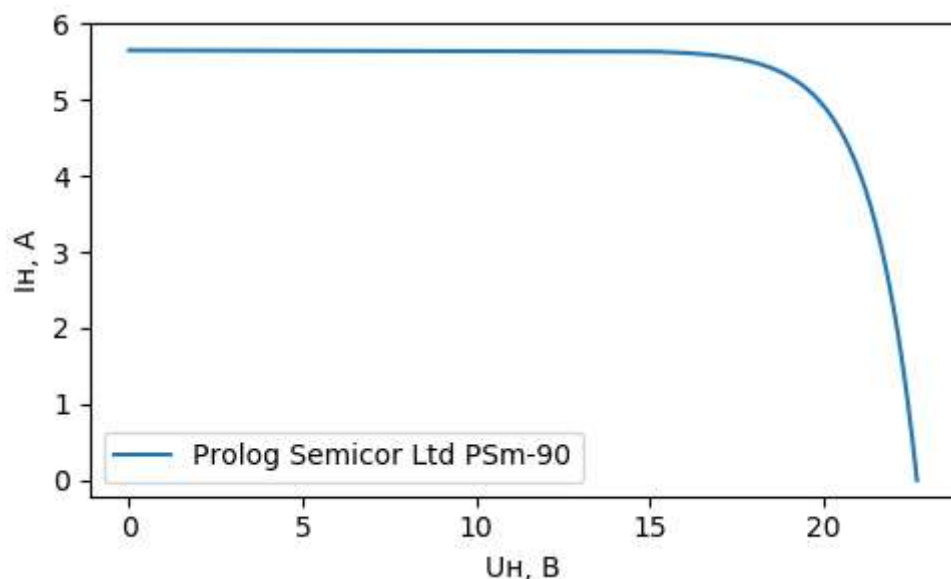


Рис.2.11. Побудована ВАХ розрахованої моделі сонячного модулю Prolog Semicor Ltd PSm-90

Приведений графік очевидно має недоліки. Наприклад струм залишається майже постійним на значному інтервалі значень напруги навантаження. Для уникнення таких проблем і загалом більш адекватного відображення роботи фотоелементу необхідно використовувати більш складні моделі.

Зокрема в [23] стверджується, що достатньо окрім вже врахованих параметрів ще додати шунтуючий опір $R_{ш}$ та послідовний опір $R_{п}$ щоб «раціонально» представити фотоелемент. Шунтуючий опір виникає за рахунок наявності зворотнього опору р-n-переходу та різноманітних провідних плівок чи забруднень на поверхні елементу. Послідовне в свою чергу пояснюється опором контактів та опір самого напівпровідникового матеріалу з якого виготовлено фотоелемент.

Оскільки взаємодія інших частин програмного середовища с моделлю фотоелементу відбувається лише через набір функцій, які структурно не залежать від використаної моделі елементу, то вважається необхідним не тільки реалізувати бібліотеку моделей в майбутньому, а й надати можливість написання своєї моделі з використанням лише деяких елементів мови Python.

Як було показано вище, створена модель дозволяє отримати всі можливі точки ВАХ. Оскільки часто в програмі необхідно буде шукати робочу точку на цій ВАХ, то необхідно надати функцію пошуку R серед можливих значень, або хоча б виділення інтервалу на якому знаходиться шукана точка $R = U_H / I_H$.

Аналіз виразу (2.4) покаже, що опір навантаження монотонно спадає з ростом струму навантаження аж допоки не досягне значень точки короткого замикання. Це видно якщо диференціювати вираз опору по струму:

$$\left(R_H \right)_{I_H} = \left(\frac{U_H}{I_H} \right)_{I_H} = -\frac{\alpha}{I_H} \cdot \left(\frac{1}{I_\phi - I_H + \beta^{-1}} + \frac{1}{I_H} \cdot \ln(\beta \cdot [I_\phi - I_H] + 1) \right).$$

Оскільки I_H змінюється в межах від 0 до струму короткого замикання (а це і фотострум за даною моделлю), то залишається довести що вираз у дужках

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

не змінює знаку на всьому інтервалі значень I_H . Для логарифму очевидно що вся складова більша, або дорівнює нулю (лише у випадку $I_H = I_\Phi$). Друга складова виразу в дужках також завжди більше нуля оскільки $I_\Phi - I_H \geq 0$, а α та β більші за нуль за умовою (властивість моделі). Отриманий результат дозволяє організувати пошук необхідної точки в одному напрямку, тобто якщо відомо що $R \geq R_H(I_r)$, то шукати точку на ВАХ з заданим R необхідно лише на ділянці $I \leq I_r$.

Як видно на рис.2.11. наявні характерні інтервали ВАХ. Очевидно, що на деяких ділянках функція добре апроксимується лінійною. Це дозволяє зменшити обсяг необхідних розрахунків, а саме кількість звернень до виразу (2.4) порівняно важкого для обрахунку на ЕВМ. Пошук таких інтервалів може бути виконаний мінімізацією похибки наближення на цих інтервалах і вирішено для усього сімейства таких функцій ВАХ, але в цій роботі був реалізований лише однонапрямлений пошук.

Не менш важливим питанням є пошук необхідної точки при зміні інтенсивності сонячного випромінення, адже це значно збільшує об'єм необхідних розрахунків. Було прийняте рішення про спрощення моделі наступним чином. Залежність фотоструму від інтенсивності сонячного випромінення подана у виразі (2.5) узагальнюється для кожного можливого значення струму навантаження.

$$I_\Phi(W) = \left(W / W_0 \right) \cdot I_{\Phi_0}, \quad (2.5)$$

де W_0 – стандартна інтенсивність випромінення (див. Standard Test Conditions), I_{Φ_0} - фотострум елемента за стандартної інтенсивності випромінення.

Таке спрощення, згідно з графіком, поданим наприклад у [4] не викликає значних помилок обрахунків при інтенсивності світла більшій за 50-100 Вт/м², але дозволяє отримати співвідношення для зведення задачі пошуку робочої точки фотоелемента при зміні інтенсивності до пошуку деякої робочої точки

на ВАХ для стандартної інтенсивності. На рис.2.12 показано як змінюється значення опору в шуканій точці.

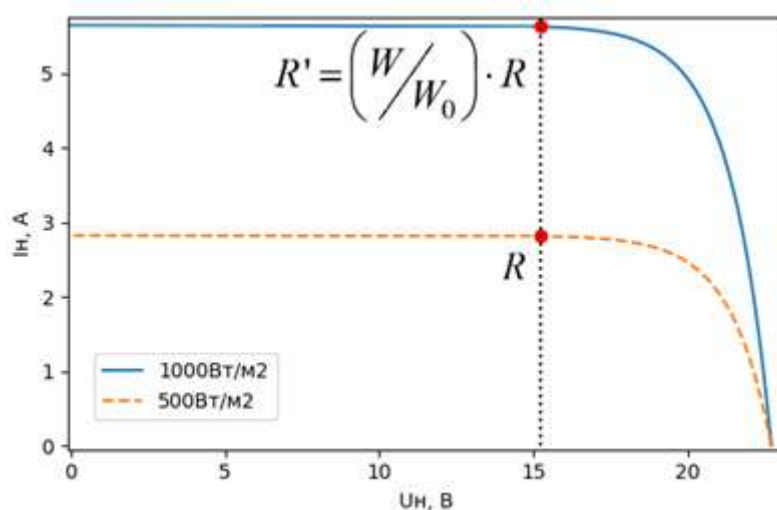


Рис. 2.12 Техніка розрахунку R' для спрощення задачі пошуку робочої точки фотоелементу

Так, була отримала залежність:

$$R' = \left(\frac{W}{W_0} \right) \cdot R,$$

де R - точка на ВАХ для інтенсивності випромінення W , а R' - точка для стандартної інтенсивності випромінення. Таким чином робота програми була зведена до роботи лише з одним графіком ВАХ фотоелементу. Для малих значень інтенсивності випромінення необхідно ускладнити модель, але очевидно, що значного вкладу в роботу електростанції панелі з такими значеннями інтенсивності робити не будуть. Тим не менш, питання точного наближення значень струму в таких панелях при знаходженні робочої точки залишається невирішеним.

Таким чином, створений клас *Тип сонячних панелей* на основі переданих в нього даних про фотоелемент будує модель і забезпечує інші частини програми необхідними для роботи функціями, як-то отримання робочої точки, або розрахунок напруги навантаження за переданим струмом.

3. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В РОЗРОБЛЕНІЙ ПРОГРАМІ

3.1. Опис інтерфейсу програми

В цьому розділі розглянуто результати процес моделювання сонячної електростанції в розробленому програмному середовищі та наведені його результати для випадку однієї панелі, серії з десяти панелей та цілого поля, побудованого за наведеним у підпункті 2.3.1 алгоритмом. Проте спершу необхідно описати блоки, з яких складається програмне середовище. Загалом воно складається з двох вікон: вікна задання параметрів та вікна моделювання.

Вікно задання параметрів, наведене на рис. 3.1, складається з таких блоків:

- У блоці Load Parameters задаються опір навантаження та надається можливість автоматичного вибору опору навантаження. Процес вибору такого навантаження полягає у фіксації точки максимальної потужності при заданій конфігурації сонячної електростанції (див. блок PV Station Structure) та величині інтенсивності сонячного випромінювання. В якості навантаження системи також може виступати акумуляторна батарея (Storage battery) чи перетворювач (Converter).

- Блок PV Panel Parameters описує параметри сонячних панелей, що входять до складу сонячної електростанції і надає можливість або вибрати сонячну панель серійного виробництва, або задати основні параметри панелі, до яких відносяться: напруга та струм у точці відбору максимальної потужності; напруга та струм холостого ходу; ширина та висота панелі.

- У блоці PV Station Structure задаються параметри з'єднання панелей у сонячній електростанції, а також показана схема з'єднання. До параметрів з'єднання сонячних панелей відносяться:

- 1) кількість панелей, що з'єднані послідовно n ;
- 2) кількість паралельно з'єднаних гілок панелей m ;

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

4) кількість груп з однаковим з'єднанням k ; 4) відстань між сусідніми панелями по горизонталі w' та по вертикалі h' .

- Блок Cloud Cover дозволяє обрати тип, розміри та прозорість хмари, яка буде проходити над площиною сонячної електростанції.

- У блоці Cloud Passage задаються рівняння руху хмари по осям ОХ $x(t)$ та ОУ $y(t)$, а також дискретний крок dt , з яким моделюється рух хмари

До кожного з параметрів моделі при наведенні курсора на значок ? виводиться довідкова інформація з описом параметру.

Для запуску програми після введення даних здійснюється перехід у меню моделювання (Modeling) з подальшим натисненням Run (Ctrl+F9). Якщо помилки у введених даних відсутні, то відкриється вікно моделювання. Якщо ж при введенні даних сталася помилка, то відповідне повідомлення з'явиться у стрічці стану програми. Наприклад при помилці при введенні даних у поле «Cloud Cover» з'явиться повідомлення «Choose your cloud!».

Вікно моделювання наведено на рис. 3.2.

Вміщує такі блоки (відповідно до номеру на зображенні).

1) Кнопки керування процесом моделювання. Зліва дві кнопки відповідають за масштаб відображення сцени (зменшують та збільшують його відповідно). Далі ідуть кнопки, в порядку зліва направо, запуску процесу моделювання, виконання одного кроку процесу, його призупинення та повної зупинки, а також виконання декількох кроків моделювання.

2) Виведені основні параметри моделювання. Серед таких тип використаної панелі, структура сонячної електростанції та опір навантаження.

3) Графік потужності, яка виділяється на навантаженні внаслідок роботи сонячної електростанції.

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

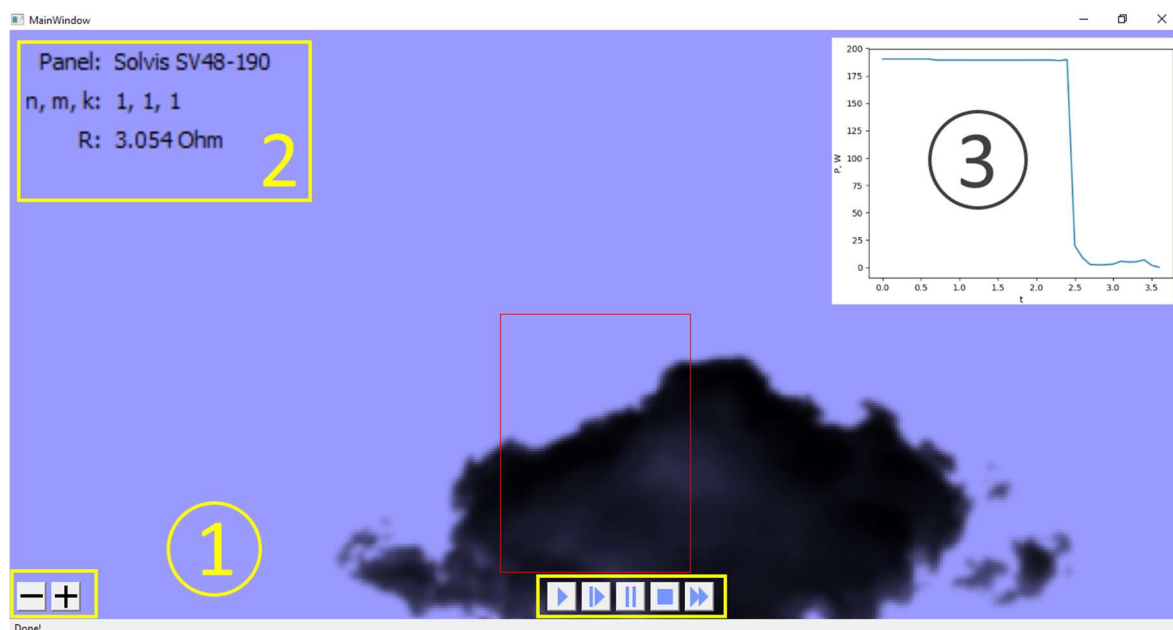


Рис. 3.2. Вікно моделювання

В центрі екрану знаходиться схематичне зображення електростанції. Побудовано згідно з наступними принципами: серія панелей обведена прямокутником, серії однієї групи розташовані в один стовбець і в той же час серії різних груп обведені різними кольорами. Так, на рис.3.2 зображена лише одна панель.

3.2. Результати моделювання

В якості сонячних панелей у всіх випадках були використані панелі *Solvis SV48-190*. Крім того було обрано автоматичний розрахунок опору навантаження для фіксації точки максимальної енергії за інтенсивності випромінювання 1000Вт/м². Отримані результати показують як і правильність алгоритму знаходження такого опору, так і неточність використаної моделі фотоелементу оскільки в усіх випадках панелі генерували більше енергії, ніж були спроможні в точці максимальної енергії, указаній виробником.

Параметри, з якими проводилося моделювання наведено в табл.3.1.

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Таблиця 3.1.

Параметри моделювання для однієї панелі

Параметри	Значення	Параметри	Значення
n	1	$X_{мара}$	('Other', 2)
m	1	w_X	5 м
k	1	h_X	5 м
w'	0 м	$y(t)$	t
h'	0 м	$x(t)$	t

В результаті було отримано графік потужності сонячної електростанції (однієї панелі в даному випадку), який наведено на рис. 3.3.

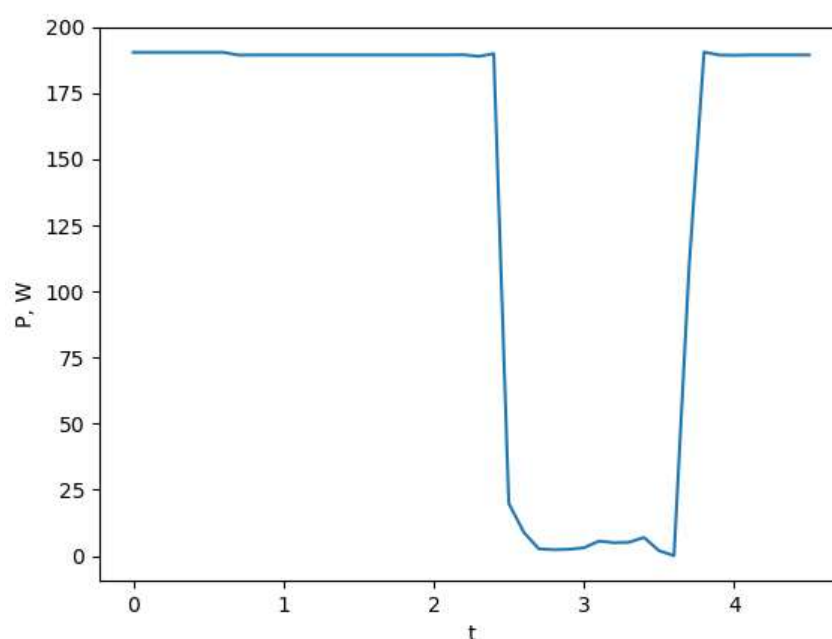


Рис. 3.3. Графік потужності яку генерує панель при проходженні хмари

Максимальна потужність при цьому складає 190.4 Вт, що дещо більше за максимальну потужність даного типу панелей, але різниця в 0.3 Вт не значуща. Спостерігаються незначні стрибки потужності перед провалом. Це пов'язано з похибкою апроксимації, яка викликана саме значним стрибком індексу прозорості. Оскільки дані про хмару були отримані не з джерел,

згаданих в пункті 1.3, то такі стрибки наявні, але при роботі з реальними даними подібного спостерігатися не буде.

Параметри, з якими проводилося моделювання наведено в табл.3.2.

Таблиця 3.2.

Параметри моделювання для однієї панелі

Параметри	Значення	Параметри	Значення
n	10	$X_{мара}$	('Other', 2)
m	1	w_X	5 м
k	1	h_X	5 м
w'	0 м	$y(t)$	t
h'	0 м	$x(t)$	$2.5 \cdot t$

В результаті було отримано графік потужності сонячної електростанції (однієї панелі в даному випадку), який наведено на рис. 3.4.

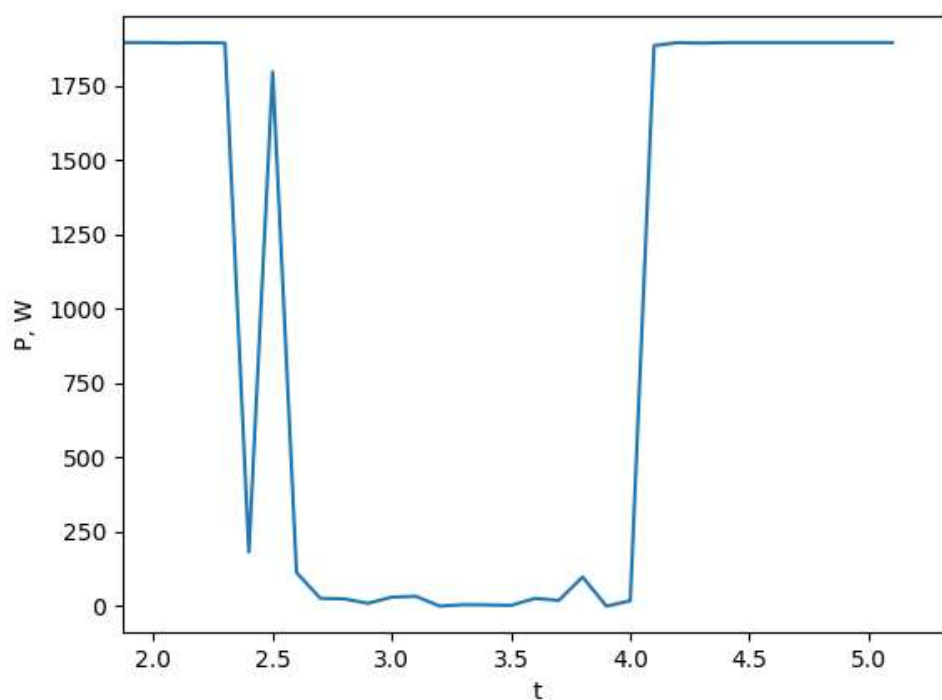


Рис. 3.4. Графік потужності яку генерує серія панелей при проходженні хмари

Як видно з рис. 3.3 та рис. 3.4, розрахунок значень інтенсивності сонячного випромінення в одній точці панелі призводить до значного спрощення реальних процесів, викликаних затіненням панелів хмарами. В іншому графік поводить ся передбачувано, оскільки затінення однієї панелі в серії призводить до падіння струму майже до нуля.

Це підтверджують дані табл. 3.3 потужності на деякому інтервалі моделювання. Потужність спадає іноді до 0, як і очікувалося.

Таблиця 3.3.

Дані про потужність з деякого проміжку часу моделювання

<i>t</i>	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
<i>P, Вт</i>	113.1	26.5	24.7	9.7	30.5	33.4	0.3	5.2	4.436	2.829

3.2.3. Поле панелей

В цьому пункті моделювалася робота цілого поля з 500 панелей. Параметри, з якими проводилося моделювання наведено в табл. 3.4.

Табл. 3.4.

Параметри моделювання для однієї панелі

Параметри	Значення	Параметри	Значення
<i>n</i>	10	<i>Хмара</i>	('Other', 2)
<i>m</i>	10	<i>w_X</i>	20 м
<i>k</i>	5	<i>h_X</i>	20 м
<i>w'</i>	0 м	<i>y(t)</i>	3*t
<i>h'</i>	0 м	<i>x(t)</i>	7.5*t

Графік потужності сонячної електростанції який було отримано в результаті моделювання наведено на рис. 3.5.

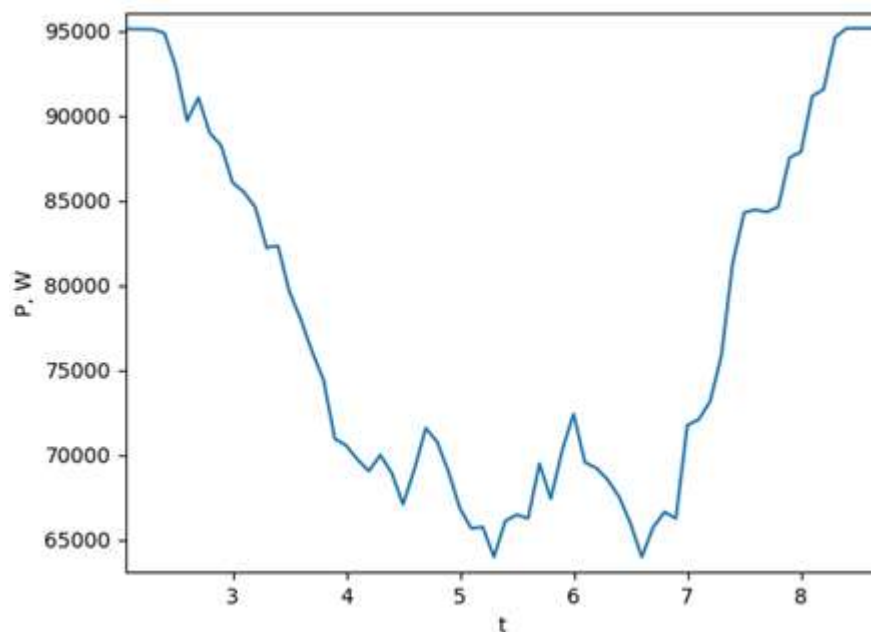


Рис.3.5. Графік потужності яку генерує поле панелей при проходженні хмари

Також біло проведено моделювання цього ж поля в тих самих умовах, але при заданих відстанях між панелями $w' = 5 \text{ м}$, $h' = 5 \text{ м}$. Як видно з графіку на рис. 3.6, потужність не падає так сильно, як в попередній моделі сонячної електростанції, оскільки розміру хмари в нових умовах не достатньо щоб затінити значну кількість панелей одночасно. В табл. 3.4 наведено значення параметрів, за яких проводилося моделювання.

Таблиця 3.4.

Параметри моделювання для однієї панелі

Параметри	Значення	Параметри	Значення
n	10	Хмара	('Other', 2)
m	10	w_X	20 м
k	5	h_X	20 м
w'	0 м	$y(t)$	$3 \cdot t$
h'	0 м	$x(t)$	$7.5 \cdot t$

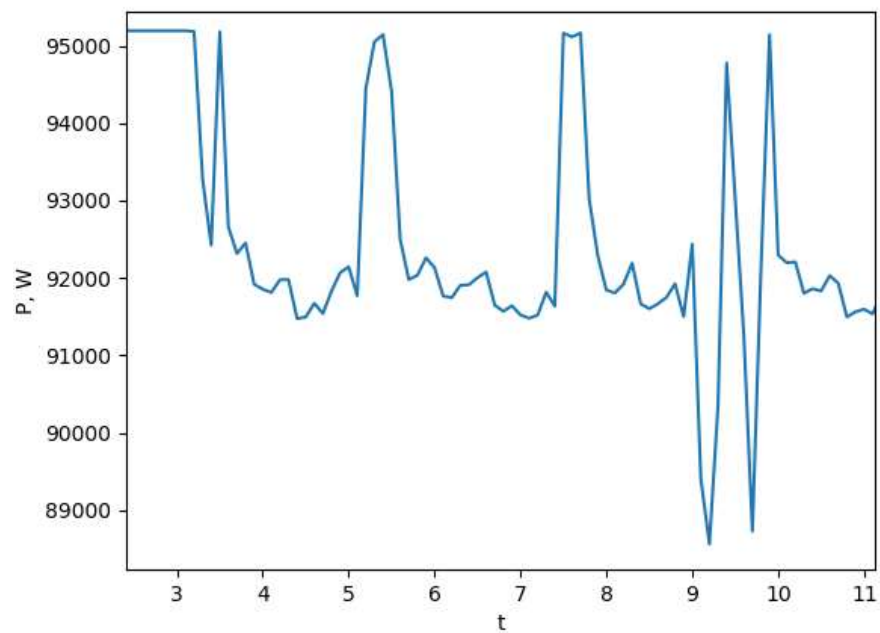


Рис. 3.6. Графік потужності поля панелей при заданих відстанях між ними

Отримані результати демонструють придатність розробленої моделі. Приведені інтерфейси вікон моделювання та задання параметрів показують легкість введення даних користувачем і отримання результатів моделювання для подальшого аналізу.

ВИСНОВКИ

Загалом в роботі можна виділити три основні напрямки, в яких було проведено аналіз та надані рекомендації щодо подолання поставлених проблем:

1) Проведений аналіз сучасних методів моделювання сонячних панелей та СЕС показав необхідність удосконалення та розширення наявних можливостей. Зокрема, необхідність врахування таких параметрів як просторове розташування, що не реалізоване в жодному розглянутому середовищі моделювання.

2) Розглянуто проблему отримання даних, які б точно відображали таке явище, як хмара. В наведеній моделі враховано лише вплив хмари на інтенсивність сонячного випромінювання. Оскільки сонячні панелі різного типу мають різну спектральну чутливість, то для подальшого покращення моделі необхідно враховувати наявні карти спектрального ефекту [6].

3) Найточніші карти, які можна отримати наведеним у роботі способом з наявних на даний момент супутників, мають роздільну здатність (в залежності від положення на орбіті) кілька десятків метрів. У зв'язку з цим необхідно використовувати алгоритм для збільшення роздільної здатності. Такий було наведено в другому розділі. Головною перевагою цього алгоритму є збереження наявних у реальної хмари флуктуацій щільності та обґрунтованість його використання (як і його параметрів) в таких задачах[8].

У майбутніх дослідженнях вбачається необхідним розширення списку факторів, що враховані моделлю. Зокрема важливими є задачі моделювання температури модулів, руху сонця, нестійкості хмарного покриву та ін. Кожна з перерахованих задач є комплексною. Наприклад задля моделювання температури модулю необхідно не лише врахувати теплообмін за рахунок випромінювання від сонця, а й врахувати швидкість теплообміну модулів з навколишнім середовищем. Спрощені моделі для врахування різниці температур і вітру наведені наприклад в [19].

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Climate&Weather, Cloud Types,
<<https://www.climateandweather.net/>>
2. Ehsanul Kabir , Pawan Kumar , Sandeep Kumar , Adedeji A. Adelodun , Ki-Hyun Kim., Solar energy: potential and future prospects, Renewable and Sustainable Energy Reviews (2018), Volume 82 Part 1, p894-900. doi: 10.1016/j.rser.2017.09.094
3. Faiman, D. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules. Prog. Photovolt. Res. Appl. 2008, 16, 307–315
4. Giuseppe Marco Tina, Marco Rosa-Clot, Vesna Lojpur, Numerical and Experimental Analysis of Photovoltaic Cells Under a Water Layer and Natural and Artificial Light. doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2896669
5. Gracia Amillo, A.M.; Huld, T. Performance comparison of different models for the estimation of global irradiance on inclined surfaces. Validation of the model implemented in PVGIS. JRC Technical Report EUR 26075 EN, JRC81902, ISBN 978-92-79-32507-6, ISSN 1831-9424, doi:10.2790/91554 2013.
6. Huld T. and Gracia Amillo A. M. Estimating PV Module Performance over Large Geographical Regions: The Role of Irradiance, Air Temperature, Wind Speed and Solar Spectrum. Energies. 2015 8, 5159-5181.
7. Huld, T.; Müller, R., Gambardella A. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa Solar Energy 2012, 86, 1803-1815.
8. Kasten F., Czeplak. G., Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud, Solar Energy (1980), Volume 24, Issue 2, p177-189. doi: 10.1016/0038-092X(80)90391-6
9. Kun Yang, Toshio Koike, Baisheng Ye, Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets. doi:10.1016/j.agrformet.2006.02.001

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

10. Lohmann G. M., A. Hammer, Adam H. Monahan, T. Schmidt , D. Heinemann., Simulating clear-sky index increment correlations under mixed sky conditions using a fractal cloud model, Solar Energy (2017) 150, p255-264. doi: 10.1016/j.solener.2017.04.048
11. Mandelbrot B., The fractal geometry of nature. W. H. Freeman and Co. (1982). ISBN 0-7167-1186-9
12. Martin N. and Ruiz J. M. Corrigendum to "Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model." Solar Energy Materials & Solar Cells. 2013, 110, p. 154
13. Met Office, 2018. How we measure cloud. <<https://www.metoffice.gov.uk/guide/weather/observations-guide/how-we-measure-cloud>>
14. Müller, R.; Matsoukas, C.; Gratzki, A.; Behr, H.; Hollmann, R. The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance—A LUT based eigenvector hybrid approach. Remote Sens. Environ. 2009, 113, 1012–1024.
15. Müller, R.; Behrendt, T.; Hammer, A.; Kemper, A. A new algorithm for the satellite-based retrieval of solar surface irradiance in spectral bands. Remote Sens. 2012, 4, 622–647
16. Muneer, T., Solar radiation model for Europe. Building Services Engineering Research and Technology 1990, 11(4), 153-163.
17. Osypenko K. S.; V. Ya. Zhuikov., The evaluation of fractal dimension and transfer function of the cloud, MikrosistElektronAkust (2017), Volume 22, №5, p13-19. <<http://elc.kpi.ua/article>>
18. Renard P., Demougeot-Renard H., Froidevaux R. (auth.) - Geostatistics for Environmental Applications. Proceedings of the Fifth European Conference on Geostatistics for Environmental Application, p41-43. (2013) ISBN 978-3-540-26533-7

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

19. Zervas P.L., Sarimveis H., Palyvos J.A., Prediction of daily global solar irradiance on horizontal surfaces based on neural-network techniques. doi:10.1016/j.renene.2007.09.020

20. Глиберман А.Я., Зайцева А.К., Кремневые солнечные батареи: Учебное пособие - Госенергоатомиздат., 1961.-74с

21. Жуйков В.Я., Клен К.С., Куцаченко Є.Р. Імітаційне моделювання руху проекції хмар над площиною сонячної електростанції. // Мікросистеми, Електроніка та Акустика. – 2018.

22. Сукач Р.В., Клен К.С., Імітаційне моделювання хмарного покриву за допомогою алгоритму diamond-square, Електронна та Акустична Інженерія, том 2 (2019), с26-29, ISSN 2425-2725

23. Федченко Т.В., Левшов А.В., Эквивалентная схема фотоэлектрического элемента и её параметры. (2014)

24. Хромов С.П., Петросянц М.А., Метеорология и климатология: учебник. Наука, 2006. 581с. ISBN 5-211-05207-2.

					ДС51.510.101.001.ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTRACT

The program contain following steps:

- 1) Image processing of cloud cover. At this stage, data is formed that will then be used to simulate the change in the intensity of radiation at the SES.
- 2) Create an interpolation grid from the data obtained in step 1).
- 3) Formation of an array of values representing the spatial arrangement of solar panels (photocells).
- 4) Submitting this array to an interpolation grid based on their spatial arrangement.

It is also necessary to separately emphasize the need to create a solar panel (PV-element) model. Since in real SES there are some degree of inertial processes, then in the future it is necessary to consider them in calculations. For the same model, it is suggested to indicate only not too small simulation steps so that the results obtained are more in line with reality.

An important issue is the *change over time of the intensity of radiation*, namely the so-called global horizontal radiation. So, there have been a number of key factors that affect this indicator. The angle of incidence of sunlight on a horizontal surface of the earth is decisive. In this case, the angle of incidence of rays has a pronounced dependence and on the position on the surface of the globe, and from the hour of the day, and from day to year. Many works are devoted to the definition of either this angle, or analysis of data on global horizontal radiation.

Although these factors are not taken into account in this paper, the possibility of their inclusion is provided by the introduction of the GHI (global horizontal irradiance) variable. That is, the construction of any model of change GHI over time reduces to manipulating the value of this variable.

The basis of the simulation model is the assumption that the clouds have a "fractal nature". Therefore, it is considered expedient to use the algorithm diamond-square to generate "self-similar" structures – fractals.

The algorithm begins with a set of arrays with length and height $2n + 1$. Next, 4 initial values are given along the edges of the array. Further work of the algorithm can be divided into two repetitive steps. The first is that for each square in the array, the value of the central element is defined as the arithmetic mean of the sum of four angular values. The second step, in turn, uses the value obtained in the previous step to obtain the angular values for the new squares as the arithmetic mean of the sum of the corresponding elements.

The value of the fractal dimension D determined by several methods, in particular the analysis of images from the satellite, was within the range of numerical values from 1.4 to 1.6. For the above purposes, it is expedient to represent the value of an array as the value of the transparency of the atmosphere k^* . GCS is the expected intensity of solar radiation on the surface of the earth in cloudy weather. Since the GCS needs to be calculated for a particular area and it is impossible to obtain the exact value even by direct measurements, its value is in general understated. This leads to the fact that k^* can take values greater than 1. With the change of the method of calculating GCS it is necessary to change and the method of calculating k^* . For example, in, the empirical formulas were obtained as a result of data analysis over 10 years of observations:

Although the algorithm considered allows you to increase the resolution of the received images, this is not enough to simulate the cloud cover, taking into account spatial placement. To solve the problem, an *approximation of the values* given by radial basis functions is proposed. Among other variants of the two-dimensional approximation, the approximation by radial basic functions is highlighted precisely because it shows good results on evenly distributed data. The resulting cloud image is a vivid example of such data - a grid of values. In addition, for the approximation of radial basis functions, there is no need for additional information to change the value of the function (the airspace index) with the change of the argument (points in space).

Among the disadvantages of this method is such an important point as the complexity of the calculations. Therefore, it is also proposed to pay attention to the fact

that processing data in the first step of the algorithm allows you to get as detailed a detailed image of the cloud cover. This makes linear approximation methods a fairly good choice. In particular, the choice of the so-called "core" of radial basis functions in the form of a linear function of distance will be considered.

Radial basis functions are a set of rigid interpolation methods, that is, the built-in function will pass through all the reference points. The radial basic function is a function of a set of radial functions used to approximate a given function. The radial function is any function that depends only on the distance to the so-called center (point c). For the approximation of functions, calculate the coefficients of the linear combination of radial basis functions:

The features of the method also include smoothing the function. That is, the assumption is that the function does not have significant jumps. As the object of the study serves as a cloud cover, then such an assumption is not strong.

To calculate the coefficients of the linear combination of radial basis functions, the least squares method is used. A cross-sectional analysis of two radial functions: linear and multiquadric. For comparison, a grid of 65x65 was formed with a grid of 1024x1024. The resulting array was used to construct two models. It was found that the average error of the calculations of the intermediate values of the grid in the case of linear radial basis functions is 2.5 times greater than the multiquadric, but in both cases it is a hundredths of a percent. However, the maximum deviation of the values for the linear model is about 5%. 1.5% respectively for multiquadric.

When using this method, it should be noted that in general, it does not solve a number of more general issues. So, unlike Bayesian methods that simulate the probability densities of each class, the method is called to describe only a specific image and the results of its execution can not be used for further analysis and obtain information about the object of research. This makes it usable only within the framework of the program being developed. To study the properties of different types of clouds and construct their models, one should take advantage of more complex statistical models.

Since Python has been chosen as the programming language, it is necessary to take into account features. Because of this, the field of solar panels is convenient to represent not as an array of objects of some class, but as a series of arrays, each of which is responsible for some characteristic panel. In working with the parameters that each panel is characterized at any time, such as spatial placement and intensity of solar radiation are taken into account.

The program has a simple function of placing the panels on the field. Parameters such as width (w) and panel height (h) are taken into account, the distance between the panels is vertically (w') and horizontally (h'), the number of successively included panels in the row (n), the number of such series in the group of panels (m), the number of panel groups (k). Series of panels of n pieces (series of panels), included in parallel with a series of panels with m panels (panel group), and are arranged in a row k groups of panels. The distances between the panels of different groups are the same as inside the group. Their position relative to the cloud will be discussed further.

Although the layout of the layout is suitable for simulating the cloud by the solar power plant, but it is necessary to include more options to take into account the features of the terrain and to expand the connection of the panels among themselves. The issue can be solved by creating a full-fledged layout editor and joining panels, but this goes beyond the scope of this work.

Taking into account the structure of the solar power plant, it is proposed to construct a grid of values $n * k$ for m elements with a step $w + w'$ horizontal and $h + h'$ vertical and initial values $w / 2$ and $h / 2$ to fix these points in the center of the panels. Within the framework of the work it is also necessary to find the measure of illumination of each of the panels. To do this, each of the values obtained, which characterize the position of the panel in space, must be submitted to the approximation of the transparency of the atmosphere. The used location, which was the basis for the derivation of the formulas for the projection of the cloud cover in relation to the solar power station, is given.

The formula is given only for the horizontal arrangement of each panel. For a vertical arrangement, the formula repeats to the corresponding characteristics, that is, where was the horizontal length of the cloud, becomes vertical, etc. Therefore, for each value of the array of spatial placement of panels, it is necessary to carry out the following operation before passing this value to the approximating function of the index of transparency of the cloud cover. The resulting x_m , respectively, will be the desired point already on the area of the projection of the cloud.

For points that do not fall into the image of the projection of the cloud, the intensity value is "supporting". In the implemented version of the software environment, this value is 1000 W/m^2 and can not be modified. This is, in essence, a significant limitation because the basis of the method for calculating the clouds index is the position on the maximum intensity of solar radiation for a particular area at a particular time. In future versions of the software, you need to be able to choose this value, set time dependencies. Significantly complicates the task of processing large amounts of data from a variety of sources.

Alternatives to this case may be measurements from the satellite, but for obvious reasons this will not solve the problem, but will allow you to correct the received ground measurements.

The data example above is not exhaustive for simulation purposes. The intensity of solar radiation, load data, temperature must be processed according to the type of panels used. Encapsulation of the required functions and data was performed by creating the Solar Panel type class.

The constituent elements of the circuit are the current source of those diode. The current source simulates the occurrence in the element of the photocurrent I_F under the influence of illumination. The diode is included in the forward direction parallel to the current source. By direct displacement due to the presence of excessive electron concentrations in the n-region of the element and excess concentrations of holes in its p region, some current of the diode flows through the diode. But in the case of modeling the work of an entire panel, some of these parameters are meaningless, therefore, a model that

is less sensible to the scale of the parameters for the construction of the VAC is not meaningful.

The resulted graph obviously has shortcomings. For example, the current remains almost constant at a significant interval of voltage values. In order to avoid such problems and in general more adequate reflection of the work of a photocell, it is necessary to use more complex models. In particular, [ibid.] It is argued that it is enough to add, in addition to the already considered parameters, the shunt resistivity of the RH and the consistent resistance of the RP to "rationally" present the photocell. Shunt resistance occurs due to the presence of the resistance of the p-n-junction and the various conductive films or contaminants on the surface of the element. The consistency in turn is due to the resistance of the contacts and the resistance of the semiconductor material from which the photocell is made.

Since the interaction of other parts of the software environment with the model of the PV-element occurs only through a set of functions that are structurally independent of the used model of the element, it is considered necessary not only to implement the library of models in the future, but also to enable the writing of its model using only some elements of the language Python.

As shown above, the created model allows you to get all possible points of VAC. Because often in the program it will be necessary to look for a work point on this VAC, then it is necessary to provide the search function R among the possible values, or at least the allocation of the interval at which the desired point is located. The result obtained allows you to arrange the search for the required point in one direction, that is, if it is known that, then it is necessary to search the point on the VAC with the given R only on the site. It is obvious that in some areas the function is well approximated linear. This allows you to reduce the amount of required calculations, namely the number of hits to the expression, which is relatively difficult to calculate on the computer. The search for such intervals can be accomplished by minimizing the approximation error at these

intervals and solving for the whole family such functions of the VAC, but only one-way search was implemented in this work.

No less important is the search for the necessary point when changing the intensity of solar radiation, because it greatly increases the volume of necessary calculations. It was decided to simplify the model in the following way. The dependence of the photocurrent on the intensity of the solar radiation is given in expression, generalized for each possible value of the load current.

Thus, the created class The type of solar panels on the basis of the data transmitted to it on the photocell builds the model and provides other parts of the program necessary for the operation of functions, such as obtaining a working point, or calculation of the voltage of the load on the transmitted current.

In this section, the results of the simulation process of the solar power plant in the developed software environment are considered and the results are presented for the case of one panel, a series of ten panels and a whole field constructed according to the algorithm presented in sub-section. However, first you need to describe the blocks from which the software environment is composed. In general, it consists of two windows: options window and window simulation.

The window for setting parameters consists of the following blocks:

- The Load Parameters section specifies the load resistance and provides the ability to automatically select the load resistance.
- The PV Panel Parameters unit describes the parameters of the solar panels that are part of the solar power plant and allows you to either select a solar panel production bay, or specify the basic parameters of the panel, which include: voltage and current at the point of maximum power selection; voltage and idle current; width and height of the panel.
- The PV Station Structure specifies the panel connection options for the solar power plant, as well as the connection scheme shown. The parameters of the connection of solar panels include: 1) the number of panels connected in series; 2) the number of parallel connected panels;

3) the number of groups with the same connection; 4) the distance between the adjacent panels horizontally and vertically.

- The Cloud Cover allows you to select the type, size, and transparency of the cloud that will pass over the solar power plane.

- The Cloud Passage unit specifies the equations of motion of the cloud on the axes of OX and OY, as well as the discrete step, with which the motion of the cloud is modeled

- * Each of the parameters of the model with the cursor on the icon displays reference information describing the parameter.

In general, there are three main areas in the work, in which analysis and recommendations for solving the problems were made:

- 1) An analysis of modern solar panel and SES modeling techniques has shown the need to improve and expand existing capabilities. In particular, the need to take into account such parameters as a spatial arrangement that is not implemented in any of the considered simulation environments.

- 2) The problem of obtaining data that accurately reflects a phenomenon like a cloud is considered. In the given model, only the influence of the cloud on the intensity of solar radiation is taken into account. Since solar panels of different types have different spectral sensitivity, for the further improvement of the model it is necessary to take into account the available maps of the spectral effect.

In future studies it seems necessary to expand the list of factors that are taken into account by the model. Particularly important are the problems of modeling the temperature of the modules, the motion of the sun, the instability of the cloud cover, and others. Each of the listed tasks is complex. For example, in order to model the temperature of the module, it is necessary not only to take into account heat exchange due to radiation from the sun, but also to take into account the heat exchange rate of the modules with the environment.